

**MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA TRANSFERENCIA INALÁMBRICA DE
ENERGÍA**

**CRISTIAN ARLEY REYES PARRA
OSCAR ANDRES RODRIGUEZ GARCIA**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ**

2020

**MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA TRANSFERENCIA INALÁMBRICA DE
ENERGÍA**

**CRISTIAN ARLEY REYES PARRA
OSCAR ANDRES RODRIGUEZ GARCIA**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

DIRECTOR:

**LUIS ALEJANDRO CAICEDO VILLALOBOS
MASTER EN INGENIERÍA**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ**

2020

Resumen

El método que se trabaja en este proceso corresponde al sistema de bobinas fuertemente acopladas de tecnología SCMR, el principio de este sistema es analógico, al conectar un arreglo de bobinas acopladas magnéticamente mejora la eficiencia de forma considerable en la transferencia inalámbrica de energía del sistema, para este proceso se deben considerar los efectos de acoplamiento cruzado de las bobinas de relevo no adyacentes y acople de impedancias con el fin de mitigar las pérdidas de eficiencia por fenómenos eléctricos y agentes externos. Para mejorar el proceso se debe ajustar la frecuencia de sintonización, la separación de las bobinas y los valores de carga; esto maximizaría la eficiencia en el sistema. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se realizará una simulación donde se evaluará el comportamiento descrito por Mehdi Kiani en su artículo de investigación (2011).

La arquitectura de los sistemas de enlace de 3 bobinas acopladas son básicamente extensión de los sistemas de dos bobinas, sin embargo, deben ser analizados de forma más detallada, hacer un análisis de impedancias reflejadas es indispensable para el proceso, también el análisis cuantitativo de la frecuencia de sintonización y la distancia son agentes que se deben detallar ya que los parámetros del sistema deben ser rediseñados dependiendo de la aplicación. En algunos casos se usa como estrategia aumentar la cantidad de bobinas, sin embargo el aumento del número de bobinas no siempre es eficiente, esto puede producir pérdidas de energía y efectos sobre la calidad del sistema, por este motivo se describe la arquitectura de 2, 3 y 4 bobinas acopladas por Mehdi Kiani el cual "hace referencia a este tipo de arquitecturas obteniendo eficiencias del 15%, 37% y 35% para enlaces inductivos de 2, 3 y 4 bobinas acopladas entre si a una frecuencia portadora de 13,56 MHz a 12 cm de distancia de acoplamiento. La propuesta del enlace inductivo de 3 bobinas es de 1,5 y 59 veces más alto que

los demás enlaces de 2 y 4 bobinas" (Kiani, 2011, p.587). Considerando la investigación descrita por el doctor Kiani, se buscara desde nuestro trabajo aportar una mejora en relación a la WPT con el fin de mejorar su eficiencia en un 45% a una distancia de 12 cm y una frecuencia de 13,56Mhz como se explicará en los capítulos precedentes.

Tabla de contenido

Resumen	i
Lista de Figuras	v
Glosario	viii
Ficha Técnica	ix
Capítulo 1	1
1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	3
1.2 Planteamiento del Problema	10
1.3 Objetivos	11
<i>1.3.1 Objetivo general.....</i>	<i>11</i>
<i>1.3.2 Objetivos específicos</i>	<i>11</i>
1.4 Justificación	12
Capítulo 2	14
2. Marco Teórico	14
<i>2.1 Inducción magnética</i>	<i>14</i>
<i>2.2 Campo magnético.....</i>	<i>14</i>
<i>2.3 Gradiente magnético.....</i>	<i>15</i>
<i>2.4 Resonancia</i>	<i>18</i>
<i>2.5 Factor de calidad</i>	<i>18</i>
<i>2.6 Factor de acoplamiento.....</i>	<i>19</i>
<i>2.7 Acoplamiento inductivo.....</i>	<i>19</i>
<i>2.8 Teoría de modo acoplado.....</i>	<i>19</i>
Capítulo 3	23

3. Marco de Contexto	23
Capítulo 4	25
4. Modelo Teórico Mehdi Kiani	25
4.1 <i>Introducción</i>	25
4.2 <i>Método de verificación.....</i>	26
Capítulo 5	32
5. Validación de Resultados de Mehdi Kiani	32
Capítulo 6	35
6. Validación del Modelo Modificado	35
6.1 <i>Introducción</i>	35
6.2 <i>Método de verificación.....</i>	35
6.3 <i>Modelo matemático</i>	35
6.4 <i>Resultado de la simulación HFSS</i>	40
Capítulo 7	46
7. Análisis de Resultados.....	46
7.1 <i>Introducción</i>	46
7.2 <i>Elaboración del procedimiento.....</i>	48
Conclusiones	54
Recomendaciones	55
Lista de Referencias	56
Anexos	57

Lista de Figuras

Figura 1. Circuito equivalente, enlace inductivo de 3 bobinas	3
Figura 2. Compara los tres sistemas mediante simulación. los SCMR tradicional exhibe un ancho de banda 3dB de 3.5 MHz y los sistemas convencionales tienen una onda en banda, mientras que el sistema SCMR propuesto exhibe un ancho de banda de 3 dB de 30 MHz, que es 8 veces más grande.....	4
Figura 3. Diagrama de palanca, el diseño del sistema CT6 mantiene los parámetros básicos del enfoque en el sistema Volt/Malibu es decir, puede funcionar completamente eléctrico aumentando su rendimiento y combinando su flexibilidad y eficiencia, también funciona como el PHEV	5
Figura 4. Esquema de la configuración experimental se desarrolla con bobinas de tipo (WWC). A) es un bucle de cobre único de radio 25 cm que forma parte del circuito de excitación, que emite una onda sinusoidal con frecuencia de 9,9 MHz. S y D son respectivamente las bobinas fuente y dispositivo a las que se hace referencia como Rx y Tx. B) es un bucle de cable conectado a la carga (Bombilla). Los diversos K representan acoplamiento directo entre los elementos indicados por las flechas. El ángulo entre las bobinas D y el lazo A se ajusta para asegurar que su acoplamiento sea cero, mientras que las bobinas S y D se alinean coaxialmente. Los acoplamientos directos entre B y A y entre B y S son insignificantes.	6
Figura 5. Esquema de acoplamiento resonante. A) acoplamiento resonante con carga significativa por la fuente y carga, resulta de un factor de calidad bajo (Q). B) acoplamiento resonante con la fuente y carga inductivamente acoplada a los circuitos resonantes de tal manera que refleja altas impedancias paralelas, resultando un factor de calidad alto (Q).....	7
Figura 6. Circuito equivalente del sistema, convertidor DC/DC para realizar la adaptación de impedancias, se acopla el inversor mediante un conjunto de transistores MOSFET en la fuente.....	8
Figura 7. Circuito equivalente del sistema WPT propuesto para un sistema de TV inalámbrico.....	9
Figura 8. Representación del gradiente magnético al interactuar con la bobina B1 (emisor) y B2 (receptor) con corrientes en sentido contrario creando sobre el eje del imán una variación uniforme del campo magnético β a lo largo de la dirección del eje Z	16
Figura 9. Representación gráfica del comportamiento del gradiente en un intervalo de tiempo. Si observamos la gráfica deducimos que tiene la forma de una señal escalón, donde t_1 se activa al llegar al valor máximo y se mantiene constante durante el intervalo Δt y finaliza en t_2 . El valor $+G_z$ indica creciente en un sentido mientras que los valores de gradiente negativos indicarían valores crecientes de campo magnético en sentido contrario	17
Figura 10. Representación gráfica del comportamiento del gradiente en condiciones naturales. Al observar la gráfica se asemeja con la figura anterior (figura 9). El (plateau) es lineal y constante en la zona de trabajo o amplitud máxima, el rise time corresponde al tiempo desde la puesta en marcha hasta alcanzar el valor máximo y el slew rate corresponde a la pendiente en la apertura.....	17
Figura 11. Basado en la interfaz de Ansys HFSS.	24

Figura 12. Circuito agrupado del enlace inductivo de 3 bobinas fuertemente acopladas	26
Figura 13. Modelo analizador de red de dos puertos sintonizado a la frecuencia portadora	29
Figura 14. A) montaje experimental para la medición de la eficiencia (PTE) en un enlace inductivo de 3-bobinas. B) simulación del enlace inductivo de tres bobinas en el software HFSS... ..	30
Figura 15. Gráfica de la eficiencia para los sistemas de 2, 3 y 4 bobinas	31
Figura 16. Simulación del sistema de enlace de 3 bobinas propuesto por Mehdi Kiani.....	32
Figura 17. Representación de la eficiencia en el ambiente HFSS para una distancia de acoplamiento de 12cm	33
Figura 18. Patrón de radiación del sistema de 3 bobinas inductivas de Mehdi Kiani.....	33
Figura 19. Ganancia del sistema de 3 bobinas inductivas de Mehdi Kiani	34
Figura 20. Simulación del enlace de 3 bobinas modificado	41
Figura 21. Resultado de la eficiencia del modelo Modificado	42
Figura 22. Ganancia del sistema de 3 bobinas inductivas de modelo modificado.....	43
Figura 23. Patrón de radiación del sistema de 3 bobinas inductivas del modelo modificado.....	43
Figura 24. Modelo enlace inductivo modificado: Versión final	44
Figura 25. Resultado de la PTE del modelo modificado obteniendo una eficiencia del 45%.....	45
Figura 26. Concentración del campo electromagnético y lóbulo de radiación de modelo final.....	45
Figura 27. Eficiencia de los enlaces de tipo WPT: A) modelo enlace inductivo de 3 bobinas propuesto por Mehdi Kiani. B) comparación de los enlaces propuestos por Mehdi Kiani en relación a la eficiencia (PTE). C) modelo replicado del enlace de Mehdi Kiani. D) representación de la eficiencia del modelo replicado obteniendo gráficamente 37 % de eficiencia a 12 cm de distancia.	47
Figura 28. Análisis gráfico del lóbulo de radiación de los enlaces inductivos propuestos. A) lóbulo de radiación del primer enlace inductivo obteniendo un 57 % de PTE, B) lóbulo de radiación del enlace final obteniendo un 45 % de PTE, C) lóbulo de radiación del enlace replicado 3-coil de Mehdi Kiani obteniendo un 37 % de PTE, D) ganancia del sistema del primer enlace inductivo propuesto obteniendo 57% de PTE, E) ganancia del sistema inductivo final obteniendo un 45% de PTE, F) ganancia del sistema inductivo replicado 3-coil obteniendo un 37% de PTE.....	49
Figura 29. Eficiencia del sistema a 12 cm: A) se replica la simulación de la arquitectura de 3 bobinas propuesto por Mehdi Kiani, B) simulación de la arquitectura modificada	50

Figura 30. Eficiencia de la arquitectura propuesta: A) se replica la simulación de la arquitectura de 3 bobinas propuesto por Mehdi Kiani obteniendo una eficiencia del 37 %, B) simulación de la arquitectura modificada obteniendo gráficamente una eficiencia del 45 %.....	51
Figura 31. Eficiencia de los enlaces de tipo WPT: A) modelo enlace inductivo de 3 bobinas propuesto por Mehdi Kiani, B) comparación de los enlaces propuestos por Mehdi Kiani en relación a su eficiencia (PTE), C) modelo enlace inductivo propuesto, D) representación de la eficiencia del primer modelo propuesto	52
Figura 32. Eficiencia de los enlaces de tipo WPT: A) modelo enlace inductivo de 3 bobinas propuesto por Mehdi Kiani, B) comparación de los enlaces propuestos por Mehdi Kiani en relación a su eficiencia (PTE), C) modelo enlace inductivo final, D) representación de la eficiencia del modelo final	53
Figura 33. Diagrama de flujo del proceso HFSS	57
Figura 34. Selección del tipo de solución del sistema	58
Figura 35. Selección del objeto y su geometría	59
Figura 36. Especificación de la geometría de cada bucle	59
Figura 37. Selección del tipo de material	60
Figura 38. Atributos del material	60
Figura 39. Asignación de las propiedades electromagnéticas y puertos de excitación	61
Figura 40. Simulación y asignación de la frecuencia de operación.....	62

Glosario

SCMR: Resonancia magnética fuertemente acoplados.

WPT: Transferencia de energía inalámbrica.

CMT: Teoría de modos acoplados.

SR: Resonadores en espiral.

PTE: Transferencia de energía eficiente.

PDL: Transferencia de potencia a la carga.

NVH: Ruido, Vibración y Dureza.

PHEV: Transmisión de potencia dividida del vehículo eléctrico híbrido.

PSC: Bobinas impresas en espiral.

WWC: Bobinas de alambre enrollado.

CVT: Transmisión variable continua.

Lóbulo De Radiación: Es el margen angular referente a la dirección de radiación.

EM: Electromagnética.

RF: Radiofrecuencia.

HFSS (High frequency Structure System): Sistema de estructura de alta frecuencia.

Ficha Técnica

Título:

Mejora de la eficiencia en la transferencia inalámbrica de energía

Alternativa:

Trabajo de investigación tecnológica.

Línea de investigación:

SCMR

Eje temático:

Gestión y tecnología para la transferencia de energía de forma inalámbrica.

Capítulo 1

1. Introducción

La transferencia inalámbrica de energía ha sido abordada desde 1900 por Nicola tesla. En los últimos años la transferencia de energía inalámbrica (WPT) ha atraído una atención considerable, los sistemas de transmisión de energía vía inalámbrica se tornan en una investigación a la cual se le da más importancia de la que se tenía hace algunos años. La industria automotriz presenta la arquitectura PHEV relacionando rendimiento eléctrico y térmico teniendo en cuenta el rendimiento de ruido, vibración y dureza (NVH), el cual mejora la eficiencia de transferencia de potencia y la ondulación del par (Jurkovic, 2016, Electric Traction Motors for Cadillac CT6 Plugin. Hybrid-Electric Vehicle). Recientemente se estudian diversas tecnologías para dispositivos electrónicos, sin embargo la mayoría de las tecnologías no son adecuadas para la transferencia eficiente de energía a ciertas distancias ya que la mayor parte de la energía se pierde en el espacio libre disminuyendo su eficiencia. Mehdi Kiani presenta diferentes arquitecturas mediante la tecnología SCMR; propone 3 arquitecturas como son enlaces de 2, 3 y 4 bobinas fuertemente acopladas, Kiani afirma: "El enlace de 3 bobinas obtiene mejor eficiencia evaluándolo a 12 cm y alcanzando un 37% " (Kiani, 2011, p.587). Se tienen otras investigaciones y análisis realizados, por ejemplo Stavros V. Georgakopoulos (2014), desarrolla nuevas topologías de resonadores aumentando el ancho de banda de los sistemas SCMR con el objetivo de combinar la alimentación inalámbrica y transferencia de datos a través del mismo enlace inalámbrico; aunque los sistemas SCMR aún están en desarrollo, los resultados que se obtienen no son similares a la investigación realizada con 3 bobinas sin embargo están descritos en la misma línea de investigación.

El trabajo se basa en la arquitectura de enlace de tres bobinas fuertemente acopladas propuesto por Mehdi Kiani, se trabaja en la mejora de la eficiencia obtenida por el autor modelando y combinando los análisis obtenidos por Stavros V. Georgakopoulos con el fin de mejorar la eficiencia del 37% a una distancia de 12 cm según la investigación realizada por Mehdi Kiani (p.587).

De acuerdo a lo anterior el objetivo del presente proyecto se desarrolla con la mejora de la eficiencia en un sistema de 3 bobinas fuertemente acopladas. En el primer capítulo se presentan los antecedentes del proyecto, en el cual se describen las diferentes investigaciones realizadas con tecnología SCMR.

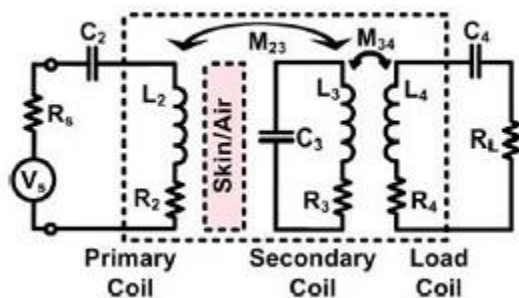
En el Siguiendo capítulo se profundiza los conceptos teóricos que orientan el presente proyecto como: inducción magnética, campo magnético, gradientes magnéticos, resonancia, factor de calidad, factor de acoplamiento, acoplamiento inductivo y teoría de modo acoplado. Posteriormente en el capítulo 3 se presenta el marco de contexto, continuando con el capítulo 4 modelo teórico de Kiani y el capítulo 5 validación de la propuesta.

1.1 Antecedentes

Kiani presenta en el 2011 la arquitectura con tres bobinas fuertemente acopladas basado en la teoría de circuitos, el autor centra su idea en la eficiencia al transferir energía de forma inalámbrica (PTE) y la potencia entregada a la carga (PDL), estos parámetros son claves en los enlaces inalámbricos con tecnología SCMR, argumenta que: "La arquitectura de tres bobinas mejora la transferencia de energía y al mismo tiempo aumenta la eficiencia de 1,5 veces en relación con la arquitectura de 4 bobinas y en 59 veces con la arquitectura de 2 bobinas acopladas" (p.587).

Figura 1.

Circuito equivalente, enlace inductivo de 3 bobinas.

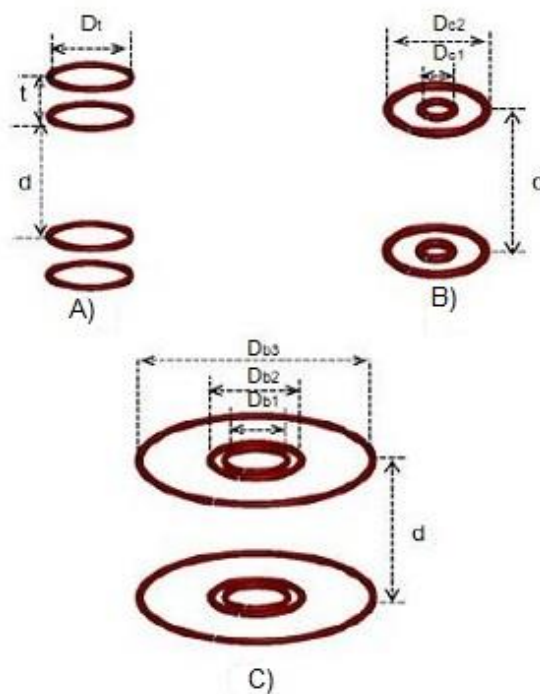


Fuente: Kiani, Design and Optimization of a 3-Coil Inductive Link for Efficient Wireless Power Transmission, 2011, p.583.

Georgakopoulos presenta en el 2014 un método SCMR sistema de banda ancha. El diseño se realiza basándose en el análisis de los sistemas SCMR de conformación, " desarrolla nuevas topologías de resonadores con el fin de aumentar el ancho de banda hasta 7 veces en relación a un sistema convencional, el diseño mantiene la eficiencia y la transferencia de energía para ser utilizado en diversas aplicaciones " (Georgakopoulos, Analysis and Design of BroadBand Wireless Power Transmission System Via Conformal Strongly Coupled Magnetic Resonance).

Figura 2.

Compara los tres sistemas mediante simulación. los SCMR tradicional exhibe un ancho de banda 3dB de 3.5 MHz y los sistemas convencionales tienen una onda en banda, mientras que el sistema SCMR propuesto exhibe un ancho de banda de 3 dB de 30 MHz, que es 8 veces más grande.

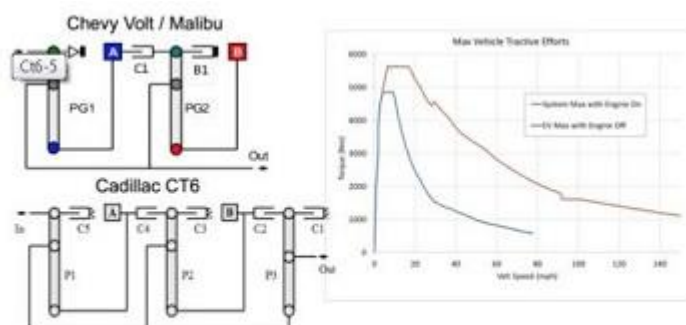


Fuente: Georgakopoulos, Analysis and Design of BroadBand Wireless Power Transmission System Via Conformal Strongly Coupled Magnetic Resonance, 2014

Jurkovic presenta en el 2016 una arquitectura de transmisión de potencia dividida del vehículo eléctrico híbrido (PHEV). Este criterio de selección, junto con la optimización del diseño de los motores eléctricos se relaciona a su rendimiento eléctrico y térmico, así como el rendimiento de ruido, vibración y dureza (NVH). Para el diseño y optimización de la arquitectura propuesta por el autor se presenta principal atención al fenómeno del NVH; rizado del par y la optimización de la fuerza radial en esta máquina. " Para el CT6, GM toma el diseño básico de la unidad de transmisión en el Volt, que permite que el CT6 funcione como un vehículo totalmente eléctrico, optimiza los parámetros principales del híbrido aumentando la eficiencia de potencia como la ondulación del par y la dureza del rotor entre otros parametros" (Jurkovic, 2016, Electric Traction Motors for Cadillac CT6 Plugin. Hybrid-Electric Vehicle).

Figura 3.

Diagrama de palanca, el diseño del sistema CT6 mantiene los parámetros básicos del enfoque en el sistema Volt/Malibu es decir, puede funcionar completamente eléctrico aumentando su rendimiento y combinando su flexibilidad y eficiencia, también funciona como el PHEV.

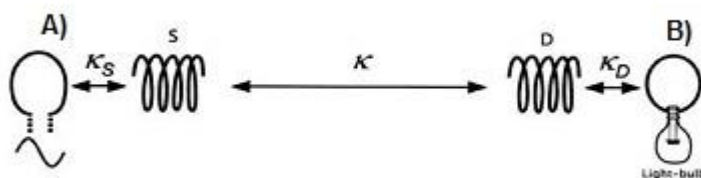


Fuente: Jurkovic, Electric Traction Motors for Cadillac CT6 Plugin. Hybrid-Electric Vehicle, 2016.

En el 2007 un grupo de investigadores de la MIT dirigidos por el profesor Marín Soljacic, desarrollaron un proyecto utilizando tecnología de resonancia magnética fuertemente acoplados (SCMR), proponen: "Un inductor como transmisor y como receptor, utilizando un oscilador colpitts estándar cuyo elemento inductivo consiste en un solo bucle de alambre de cobre de 25 cm de radio (Figura 4); este lazo de alambre se acopla inductivamente a la bobina fuente y acciona todo el aparato inalámbrico de transferencia de potencia. La carga consiste en una bombilla calibrada, y está conectada a su propio bucle de cable aislado que se coloca cerca de la bobina del dispositivo y se acopla inductivamente a él, obteniendo una eficiencia de transferencia del 40% a una distancia de 2 metros "(Kurs, 2007, p.36).

Figura 4.

Esquema de la configuración experimental se desarrolla con bobinas de tipo (WWC). A) es un bucle de cobre único de radio 25 cm que forma parte del circuito de excitación, que emite una onda sinusoidal con frecuencia de 9,9 MHz. S y D son respectivamente las bobinas fuente y dispositivo a las que se hace referencia como Rx y Tx. B) es un bucle de cable conectado a la carga (Bombilla). Los diversos K representan acoplamiento directo entre los elementos indicados por las flechas. El ángulo entre las bobinas D y el lazo A se ajusta para asegurar que su acoplamiento sea cero, mientras que las bobinas S y D se alinean coaxialmente. Los acoplamientos directos entre B y A y entre B y S son insignificantes.

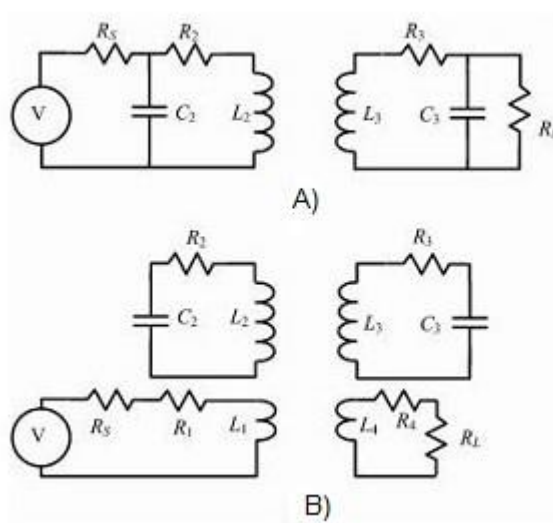


Fuente: Kurs, Power Transfer through Strongly Coupled Resonances, 2007, p.35.

Cannon propone en el 2009 un sistema de arquitectura basada en la transferencia de energía de forma inalámbrica a través del acoplamiento resonante magnético, la resonancia entre la fuente y las bobinas de tipo (WWC) de carga se logra con condensadores agrupados; desarrolla un modelo de circuito para describir el sistema con un solo receptor y optimiza un modelo con dos receptores. "En el sistema de un solo receptor en resonancia, obtiene una eficiencia del 50% de la potencia que suministra la fuente a la carga, estas bobinas son de relevo múltiple y señalan que el fenómeno de división de frecuencia sucede siempre que dos bobinas receptoras se coloquen lo suficientemente próximas " (p.1819).

Figura 5.

Esquema de acoplamiento resonante. A) acoplamiento resonante con carga significativa por la fuente y carga, resulta de un factor de calidad bajo (Q). B) acoplamiento resonante con la fuente y carga inductivamente acoplada a los circuitos resonantes de tal manera que refleja altas impedancias paralelas, resultando un factor de calidad alto (Q).

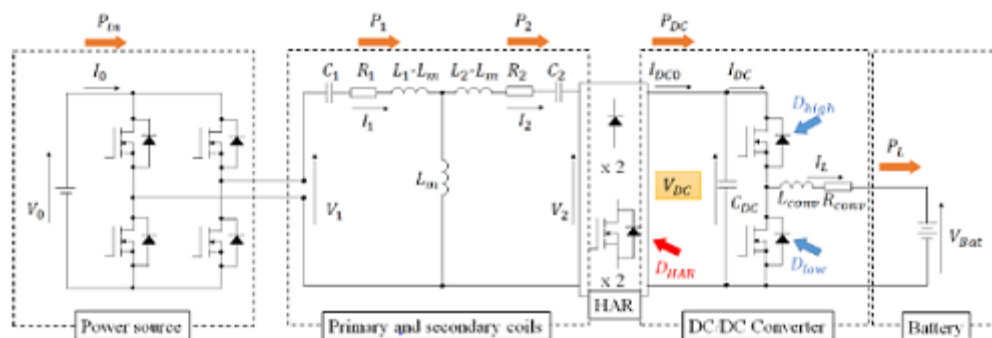


Fuente: Cannon, Magnetic Resonant Coupling as a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers, 2009, p.1822.

La transferencia de energía inalámbrica a través del acoplamiento de resonancia magnética tiene desventajas en los acopladores de impedancia, uno de ellos es el aumento de la potencia reflejada causando una disminución en la eficiencia. Imura en el 2011 propone atacar este problema que simplemente es en el acople de impedancia, plantea: "Un convertidor DC/DC para realizar la adaptación de impedancia mediante el ajuste del ciclo de trabajo. Utiliza la topología Buck-Boost para ajustar la impedancia equivalente de cero al finito" (Imura, 2011, Basic Study on Reduction of Reflected Power Using DC/DC Converters in Wireless Power Transfer System Via Magnetic Resonant Coupling)

Figura 6.

Circuito equivalente del sistema, convertidor DC/DC para realizar la adaptación de impedancias, se acopla el inversor mediante un conjunto de transistores MOSFET en la fuente.

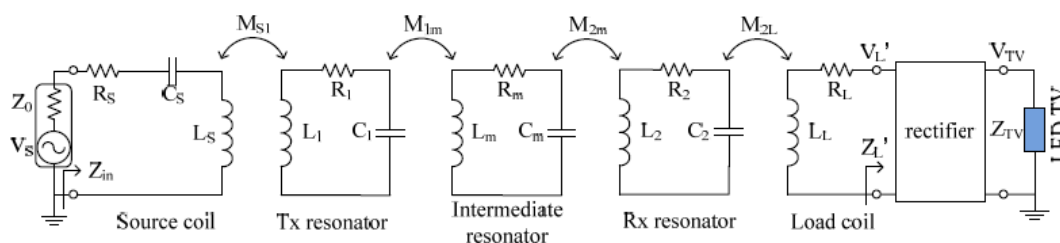


Fuente: Imura, Basic Study on Reduction of Reflected Power Using DC/DC Converters in Wireless Power Transfer System Via Magnetic Resonant Coupling, 2011.

Kim, Jinwook propone en el 2012 una aplicación asimétrica de la transferencia inalámbrica de energía (WPT), diseña un equipo fuente de alimentación para TV led, donde: "la frecuencia de operación es de 250khz a un potencia de transferencia de 150w y una eficiencia del 80% respectivamente, el sistema WPT se compone de tres autoresonadores: un resonador TX, un resonador Rx y un resonador intermedio, los resonadores TX y RX son perpendiculares y desplazados respectivamente al resonador intermedio en la geometría" (p.779).

Figura 7.

Circuito equivalente del sistema WPT propuesto para un sistema de TV inalámbrico.



Fuente: Kim, Jinwook, Optimal Design of a Wireless Power Transfer System with Multiple Self-Resonators for an LED TV, 2012, p.776.

1.2 Planteamiento del Problema

La transferencia inalámbrica de energía es el campo de investigación donde nos centraremos más exactamente en la tecnología SCMR, de acuerdo al proceso descrito por Mehdi Kiani (2011, p.579) y Georgakopoulos (2014, Analysis and Design of BroadBand Wireless Power Transmission System Via Conformal Strongly Coupled Magnetic Resonance) se identifican afectaciones en el proceso de transferencia de energía vía inalámbrica en relación a su eficiencia (PTE) y suministro de potencia (PDL), se plantea analizar fenómenos eléctricos y acoples de impedancia con el fin de mitigar pérdidas de energía y disminución de la eficiencia en los sistemas SCMR; las pérdidas de energía son directamente proporcionales a la distancia y este es el problema en el cual nos queremos enfocar, buscaremos desde la arquitectura de resonancia magnética fuertemente acoplada (SCMR) un planteamiento que nos permita aumentar la eficiencia del sistema en relación a la arquitectura mencionada anteriormente "enlace de 3 bobinas" (p.582), el cual nos permitirá reducir fenómenos eléctricos, onda reflejada y ruido en el medio de transmisión, obteniendo una mayor eficiencia de energía en el receptor y consigo una mayor distancia en el suministro de energía, este proceso se mostrará mediante simulación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Proponer una arquitectura que permita aumentar los índices de eficiencia en un 5% con respecto al resultado obtenido por Mehdi Kiani.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Analizar y comprobar los estudios realizados por Mehdi Kiani en su artículo "Design and Optimization of a 3-Coil Inductive Link for Efficient Wireless Power Transmission".
2. Modelar el resultado de la eficiencia de acuerdo con los estudios realizados por el autor Mehdi Kiani.
3. Encontrar el modelo matemático que incremente la efectividad en el sistema de transmisión vía inalámbrica.
4. Plantear arquitectura que permita demostrar mediante simulación el resultado y mejora de eficiencia.
5. Realizar pruebas, análisis de resultados y conclusiones.

1.4 Justificación

Kiani en su arquitectura de tres bobinas ofrece un sistema muy robusto con respecto a la transferencia de energía vía inalámbrica (p.579); es un hecho que la transferencia de energía es parte del sistema de suministro eléctrico a nivel mundial, actualmente se están desarrollando investigaciones en ciernes basadas en la transferencia inalámbrica de energía; se tienen antecedentes como Heinrich Hertz, quien propone la transmisión inalámbrica a través de ondas de radio y Nikola Tesla creador de la bobina (Tesla, The Transmission of Electrical Energy Without Wires, Electrical World and Engineer). De acuerdo con Joachim Durant, surge un tema de gran interés donde propone atacar fenómenos que se presentan en el proceso de transferencia inalámbrica de energía en el cual se toma el concepto de CVT (Joachim. Durant, 2015, Concept Study of a Double Rotor Induction Machine Used as Continuously Variable Transmission). En la actualidad la industria está avanzando de forma acelerada hacia el desarrollo de nuevas arquitecturas en los sistemas eléctricos; también se están teniendo en cuenta las facilidades de conexión entre elementos móviles o la comodidad del usuario, teniendo en cuenta esto, las empresas están buscando innovar y dar soluciones al cliente, por ejemplo, tener la posibilidad de activar una lavadora, un televisor, un motor en la industria sin tener que conectar cables a las tomas eléctricas. Esto se está trabajando recientemente por diferentes investigadores, entre ellos Kim, Jinwook (2012) diseñan un equipo de fuente de alimentación vía inalámbrica para TV led (p.775), sin embargo en las diferentes investigaciones realizadas se obtiene como conclusión la desventaja que tiene el sistema en la entrega de potencia (kennan, 2008, Efficient Wireless Transmission of Power Using Resonators With Coupled Electric Fields), siempre se encuentra como debilidad la pérdida de potencia en el proceso de transferencia; debido a esto nos centramos en una investigación que

pueda evaluar y comprobar que estas pérdidas se pueden mejorar mediante la tecnología (SCMR); se estudiará y se analizará los enlaces de 3 bobinas acopladas magnéticamente teniendo en cuenta investigaciones realizadas por Mehdi Kiani y Georgakopoulos que se tiene como base de investigación y las cuales nos puedan llevar a mitigar fenómenos eléctricos en los sistemas SCMR (p.583).

Capítulo 2

2. Marco Teórico

2.1 Inducción magnética

El voltaje inducido es directamente proporcional a la velocidad con que cambia el flujo magnético, este principio fue formulado por Faraday en la ley de inducción electromagnética, inferimos que la inducción magnética es el proceso mediante el cual campos magnéticos generan campos eléctricos al interactuar un campo eléctrico en un material conductor, las partículas de carga se verán sometidas a una fuerza y se inducirá una corriente eléctrica en el material (Jesús M, s.f, p.14). (Ver ecuación 1):

$$\oint_c E dl = - \frac{d}{dt} \oint_s B dA \quad (1)$$

2.2 Campo magnético

El campo magnético es generado por cargas eléctricas producidas por electrones en movimiento. Estas propiedades de los campos magnéticos forman vectores axiales también denominados campos vectoriales. El campo magnético lo representaremos por β y es una magnitud vectorial, es decir, en un punto del espacio donde existe campo magnético; el valor de β se expresa en unidades de inducción (T), el Tesla (T) y el Gauss (J. Gilli, s.f, p.11) $1 \text{ T} = 10.000 \text{ Gauss}$.

Una de las condiciones que hay que considerar al valorar la intensidad del campo magnético es su homogeneidad y estabilidad en el medio. Estos conceptos hacen referencia a las variaciones relativas del campo magnético espacio-tiempo, si queremos que el campo magnético sea homogéneo que sería lo ideal debemos evaluar las condiciones del medio y su respectivo canal de transmisión o conductor, el diseño más utilizado en el mundo moderno es el conductor

en forma de helicoidal (solenoides) que logra en su interior un campo magnético homogéneo (J. Gilli, s.f, p.11).

2.3 Gradientes Magnéticos

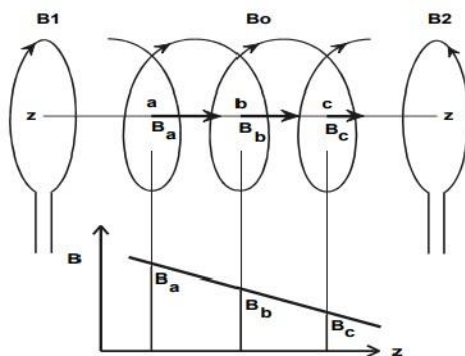
Los gradientes magnéticos son campos magnéticos que varían en posición y dirección, estos gradientes se superponen al campo magnético. El gradiente se expresa de manera vectorial (G) por ende está formado por su magnitud y dirección, su comportamiento es axial en un punto en el espacio; la amplitud del gradiente es la variación de la magnitud por unidad de longitud en aquel punto, la dirección es la orientación de la línea sobre la cual se mide la variación, y el sentido del gradiente se adopta positivo hacia el sentido en el cual crece la magnitud y negativo en sentido contrario (J. Gilli, s.f, p.12).

Los gradientes magnéticos ideales deben ser lineales, es decir que la variación de la dirección del campo sea lo más constante y uniforme posible, esto se logra mediante un par de bobinas recorridas por corriente continua en sentido contrario (Figura 8). Los gradientes hacen que la intensidad del campo magnético sea diferente en cada elemento, debido a esto entran en resonancia con frecuencias diferentes, podemos concluir que una variación uniforme del campo magnético es directamente proporcional al gradiente magnético lineal (J. Gilli, s.f, p.12).

El valor del gradiente se expresa midiendo la variación más rápida del campo magnético por unidad de longitud en la dirección determinada, su módulo representa el ritmo de variación en dicho campo, si se analiza la figura 8, la pendiente de la gráfica de la variación del campo representa la forma espacial del gradiente y su valor máximo se denota como (G_{max}), y se expresa en mili teslas/metro (mT/m) o en Gauss/cm para este caso (J. Gilli, s.f, p.13).

Figura 8.

Representación del gradiente magnético al interactuar con la bobina B1 (emisor) y B2 (receptor) con corrientes en sentido contrario creando sobre el eje del imán una variación uniforme del campo magnético β a lo largo de la dirección del eje Z.

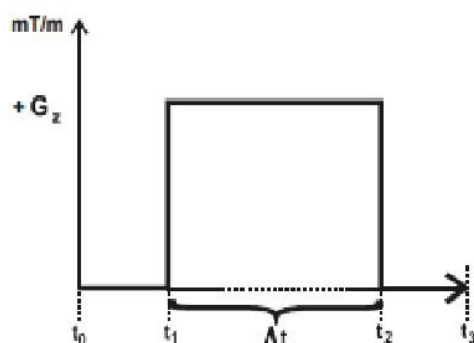


Fuente: J. Gilli, s.f, Introducción a la Resonancia Magnética en Neuroimagen, p.13.

Los gradientes magnéticos son una reacción de los sistemas de resonancia magnética fuertemente acoplados, estos gradientes al tener su estructura de forma vectorial varían dependiendo del campo magnético en magnitud y dirección actuando en diferentes instantes de tiempo, por esta razón es frecuente hablar de pulsos de gradiente que se representaran en la figura 9 (J. Gilli, s.f, p.12).

Figura 9.

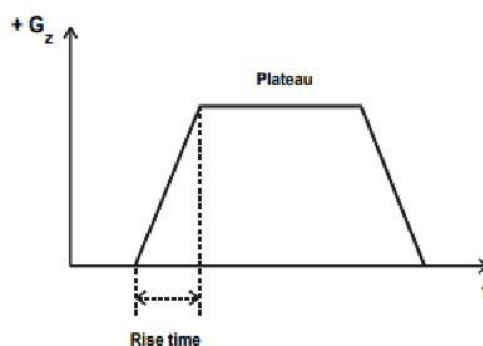
Representación gráfica del comportamiento del gradiente en un intervalo de tiempo. Si observamos la gráfica deducimos que tiene la forma de una señal escalón, donde t_1 se activa al llegar al valor máximo y se mantiene constante durante el intervalo Δt y finaliza en t_2 . El valor $+G_z$ indica creciente en un sentido mientras que los valores de gradiente negativos indicarían valores crecientes de campo magnético en sentido contrario.



Fuente: J. Gilli, s.f, Introducción a la Resonancia Magnética en Neuroimagen, p.14.

Figura 10.

Representación gráfica del comportamiento del gradiente en condiciones naturales. Al observar la gráfica se asemeja con la figura anterior (figura 9). El (plateau) es lineal y constante en la zona de trabajo o amplitud máxima, el rise time corresponde al tiempo desde la puesta en marcha hasta alcanzar el valor máximo y el (Slew Rate) corresponde a la pendiente en la apertura.



Fuente: J. Gilli, s.f, Introducción a la Resonancia Magnética en Neuroimagen, p.14.

2.4 Resonancia

Es el fenómeno que sufre un elemento al recibir una fuerza que tiene un periodo de oscilación similar; la resonancia eléctrica se genera en circuitos de tipo tanque (LC), la corriente eléctrica es inducida en el devanado que conduce a la carga del condensador, cuando el condensador se descarga, la corriente eléctrica resultante crea un campo magnético en el inductor y este proceso se repite continuamente. La resonancia se produce si la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva del circuito resultan ser iguales en magnitud, esto da lugar a la oscilación entre los campos eléctricos y magnéticos del condensador y del inductor (Jesús.M, s.f, p.15).

(Ver ecuación 2):

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

2.5 Factor de calidad

También conocido como factor de selectividad (Q), es un parámetro que mide la relación entre la energía reactiva que almacena y la energía que disipa durante un ciclo completo. El factor de calidad es muy importante a la hora de diseñar un prototipo electrónico encargado de transmitir energía vía inalámbrica, si contrarrestamos desventajas del método de resonancia fuertemente acoplada se puede lograr una mayor eficiencia a pesar de que el campo magnético se debilite al desplazarse por el espacio (Jesús M, s.f, p.16)(Ver ecuación 3):

$$Q = \omega_o \frac{L}{R} \quad (3)$$

2.6 Factor de acoplamiento

El factor de acoplamiento magnético se comporta variante en el tiempo al momento que pasa una corriente eléctrica variable por una bobina. Para la transmisión de energía eléctrica sin contacto el factor de acoplamiento (K), indica la cantidad de flujo que genera una corriente al circular por la bobina emisora y es enviada a la receptora, su valor puede variar entre 0 y 1, siendo 1 el valor ideal de acoplamiento y cero cuando no lo está (Jesús M, s.f, p.14). (Ver ecuación 4):

$$K = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (4)$$

2.7 Acoplamiento inductivo

Relacionamos acoplamiento inductivo a la transferencia resonante; al aplicar una corriente oscilante a un embobinado causa un campo magnético oscilante, la energía almacenada en la bobina se disipa de manera relativamente lenta a lo largo de varios ciclos, pero si la segunda bobina es colocada en proximidad, la bobina puede absorber gran parte de la energía antes de que la misma se pierda (Jesús M, s.f, p.21).

2.8 Teoría de modo acoplado

La CMT o teoría de modo acoplado en ondas electromagnéticas se aplican originalmente en el campo de las microondas (kennan, 2008, Efficient Wireless Transmission of Power Using Resonators With Coupled Electric Fields), de acuerdo con la CMT, los procesos físicos de

transferencia de energía de un emisor a un receptor se puede describir como (Kurs, 2007, p.13).

(Ver ecuación 5):

$$\dot{a}_m(t) = (i\omega_m - \Gamma_m)a_m(t) + \sum_{m \neq n} ik_{mn}a_n(t) + f_m(t) \quad (5)$$

Donde los índices denotan diferentes objetos resonantes $a_m(t)$, ω_m , k_{mn} , f_m y Γ_m representan la amplitud modal de la energía, la frecuencia angular de resonancia, la tasa de atenuación intrínseca y los coeficientes de acoplamiento. Al considerar las pérdidas por intercambio de energía se emplea como (Kurs, 2007, p.13). (Ver ecuaciones 6 y 7):

$$\frac{da_m(t)}{dt} = (i\omega_m - \Gamma_m)a_m(t) + ik_{mn}a_n(t) + f_m(t) \quad (6)$$

$$\frac{da_n(t)}{dt} = (i\omega_m - \Gamma_n - \Gamma_L)a_n(t) + ik_{mn}a_m(t) \quad (7)$$

Suponiendo que las propiedades de estos dos objetos resonantes son idénticos, entonces ω_m y ω_n son iguales a ω_r , k_{mn} y k_{nm} iguales a k , y al hacer que el término de conducción $f_m(t)$ sea $v e^{-i\omega t}$ la ecuación anterior se reescribe como (V. Menau, 2017, p.28). (Ver ecuaciones 8 y 9):

$$a_m(t) = \frac{[(\Gamma_n + \Gamma_L) + i(\omega - \omega_r)]v e^{i\omega t}}{k^2 + (j\omega - j\omega_r + \Gamma_m) + (j\omega - j\omega_r + \Gamma_n + \Gamma_L)} \quad (8)$$

$$a_n(t) = \frac{v e^{i\omega t}}{k^2 + (j\omega - j\omega_r + \Gamma_m) + (j\omega - j\omega_r + \Gamma_n + \Gamma_L)} \quad (9)$$

Donde Γ_L representa la tasa de atenuación de energía adicional debido a la carga. Las expresiones de eficiencia de transferencia y la transferencia de potencia de la CMT se pueden describir de la siguiente forma (V. Menau, 2017, p.28). (Ver ecuaciones 10 y 11):

$$n = \frac{\Gamma_L |a_n(t)|^2}{\Gamma_m |a_m(t)|^2 + (\Gamma_n + \Gamma_L) |a_n(t)|^2} \quad (10)$$

$$P_L = 2\Gamma_L |a_n(t)|^2 \quad (11)$$

Donde n representa la eficiencia de transferencia y P_L la transferencia de potencia. Mediante la sustitución de la ecuación (8) en las ecuaciones (10) y (11), las expresiones de eficiencia y de transferencia de potencia puede ser reescritas como (V. Menau, 2017, p.28). (Ver ecuaciones 12 y 13):

$$n = \frac{\Gamma_L k^2}{\Gamma_m [(w - w_r)^2 + (\Gamma_n + \Gamma_L)] + (\Gamma_n + \Gamma_L) k^2} \quad (12)$$

$$P_L = \frac{2\Gamma_L k^2 Y^2}{[k^2 + \Gamma_m (\Gamma_n + \Gamma_L) - (w - w_r)^2]^2 + (\Gamma_m + \Gamma_n + \Gamma_L)^2 (w - w_r)^2} \quad (13)$$

Suponiendo que este sistema funciona en el estado de resonancia, la frecuencia angular de conducción es igual a la frecuencia angular de resonancia con respecto a k y Γ_L , las condiciones de optimización que maximicen la eficiencia de transferencia y transferencia de potencia se pueden expresar de la siguiente forma (V. Menau, 2017, p.28). (Ver ecuaciones 14, 15 y 16):

$$\Gamma_{L\max} = \Gamma_n \sqrt{1 + \frac{k^2}{\Gamma_m \Gamma_n}} \quad (14)$$

$$\Gamma_{LPL\max} = \frac{k^2 + \Gamma_m \Gamma_n}{\Gamma_m} \quad (15)$$

$$k_{RL\max} = \sqrt{\Gamma_m \Gamma_n + \Gamma_m \Gamma_L} \quad (16)$$

La derivada de la ecuación (12) con respecto al coeficiente de acoplamiento no puede ser igual a cero, debido a que el decaimiento intrínseco no es cero, esto significa que no hay una k optimizada que pueda maximizar la eficiencia de transferencia (V. Menau, 2017, p.29). (Ver ecuación 17):

$$w = w_r, w_r \pm \left[k^2 - 0,5\Gamma_m^2 - 0,5(\Gamma_n + \Gamma_L)^2 \right]^{0,5} \quad (17)$$

Capítulo 3

3. Marco de contexto

La premisa del proyecto surge después de analizar el desarrollo de una tesis doctoral realizada en España por el doctor C.Manuel.V. Menau (2017, Transmisión de Energía Vía Resonancias Magnéticas Fuertemente Acopladas. Nuevos Tipos de Resonadores), dentro de esta tesis se hace referencia a los estudios desarrollados por el doctor Mehdi Kiani (2011) quien centra su investigación en la tecnología SCMR.

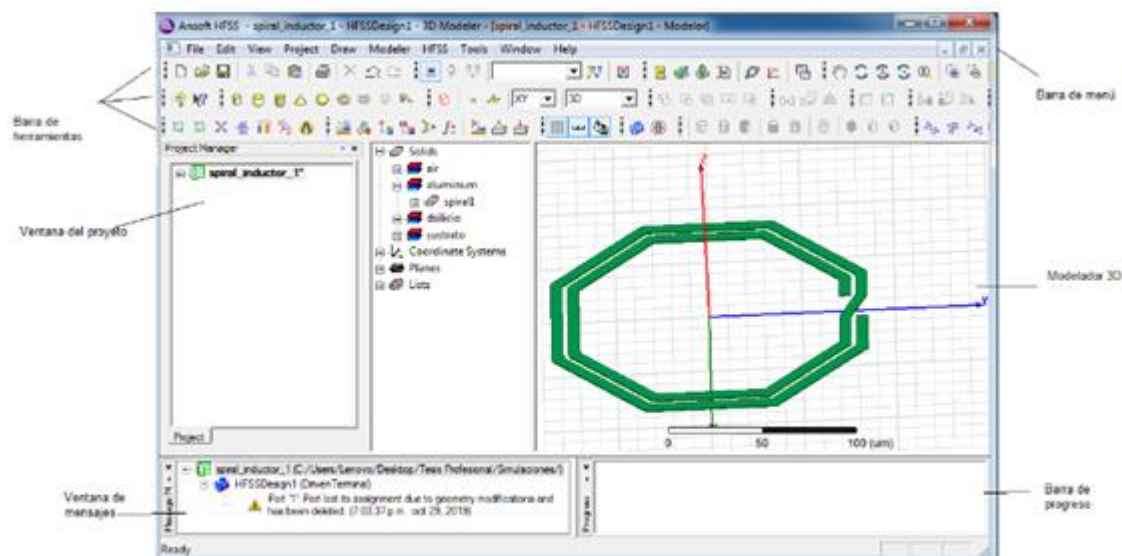
Por lo tanto, en esta propuesta se busca aportar y dar continuidad a la investigación del doctor Mehdi Kiani con el fin de alcanzar una eficiencia mayor a la obtenida por el autor mencionado.

Descripción del software: La herramienta utilizada para el desarrollo y ejecución del proyecto es Ansoft Ansys HFSS.

Ansoft Ansys HFSS: HFSS, por sus siglas en inglés (High Frequency Structure Simulator) es un simulador de campo de onda electromagnética (EM) de alto rendimiento para el modelado de dispositivos electrónicos; la elección del software se fundamenta en tecnología de computación de alto rendimiento (HPC) y proporciona un análisis preciso de simulación electromagnética.

Figura 11.

Basado en la interfaz de Ansys HFSS.



Fuente: Elaboración propia. 2020.

Primero: Se comprueba que los resultados obtenidos en el artículo sean replicados y validados en el software HFSS, una vez validado el resultado se propone realizar una mejora al desarrollo planteado por el Doctor Mehdi Kiani (2011, p.583) a una distancia de 12 cm, este proceso se desarrolla mediante simulación y validación matemática.

Segundo: De acuerdo con los resultados obtenidos se expondrá la forma más eficiente de mejorar la potencia entregada a la carga según la investigación realizada.

Capítulo 4

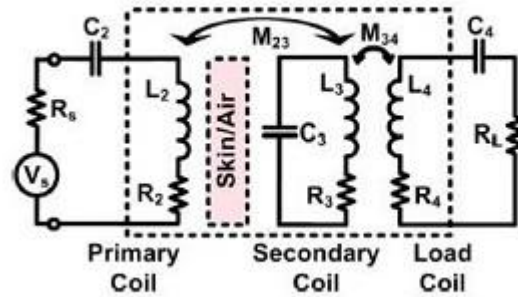
4. Modelo teórico Medhi Kiani

4.1 Introducción

En los fundamentos de su propuesta teórica de Mehdi Kiani argumenta que el enlace de 3 bobinas fuertemente acopladas vista desde la tecnología SCMR obtiene mejores resultados en relación a las demás arquitecturas propuestas. La eficiencia (PTE) y la potencia suministrada a la carga (PDL) son parámetros claves en los enlaces inalámbricos afectando las especificaciones del sistema, como son: fuente de energía, disipación de calor, campo de transmisión de potencia y la interferencia con otros dispositivos. Para mejorar la PTE, Mehdi Kiani plantea: “Un enlace de 3-bobinas inductivas a una distancia de acoplamiento de 12cm, también desarrolla una metodología de diseño iterativo que ofrece la geometría óptima en un enlace inductivo. El ejemplo de diseño de la arquitectura de 3-helicoidales se ha presentado y optimizado para una frecuencia portadora de 13,56 MHz a 12 cm de distancia de acoplamiento” (p.587), el resultado es verificado a través de simulaciones y el circuito propuesto se observa en la figura 12.

Figura 12.

Circuito agrupado del enlace inductivo de 3 bobinas fuertemente acopladas.



Fuente: Kiani, Design and Optimization of a 3-Coil Inductive Link for Efficient Wireless Power Transmission, 2011, p.583.

4.2 Método de verificación

En coherencia con este planteamiento Mehdi Kiani (2011) determina las principales características de los sistemas SCMR, posteriormente se evidencia los modelos matemáticos que determinan el desarrollo de su investigación y su validación en físico (p.586).

Modelo matemático de un enlace de 3-bobinas fuertemente acopladas propuesto por Mehdi Kiani (2011, p.582).

Obtiene la eficiencia (PTE) teórica a partir de la siguiente ecuación (Ver ecuación 18):

$$n_{3-coil} = \frac{(k_{23}^2 Q_2 Q_3)(k_{34}^2 Q_3 Q_{4L})}{\cos(\theta)(1 + k_{34}^2 Q_3 Q_{4L})\sqrt{A^2 + B^2}} \frac{Q_{4L}}{Q_L} \quad (18)$$

Donde A, B y θ son (Ver ecuaciones 19, 20, 21):

$$A = 1 + k_{23}^2 Q_2 Q_3 + k_{34}^2 Q_3 Q_{4L} \quad (19)$$

$$B = 2Q_2 Q_3 Q_{4L} k_{34} k_{23} k_{24} \quad (20)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{B}{A} \right) \quad (21)$$

Se reescribe la eficiencia del enlace de 3-bobinas como se relaciona a continuación (Ver ecuación 22 y 23):

$$n_{23} = \frac{(k_{23}^2 Q_2 Q_{3L})}{1 + k_{23}^2 Q_2 Q_3 + k_{34}^2 Q_3 Q_{3L}} \quad (22)$$

$$n_{34} = \frac{(k_{34}^2 Q_3 Q_{4L})}{1 + k_{34}^2 Q_3 Q_{4L}} \frac{Q_{4L}}{Q_L} \quad (23)$$

Según Kiani los factores de acoplamiento y factor de calidad dependen de los valores de la bobina y su geometría como se evidencia en las ecuaciones 24, 25 y 26, 27 (p.582)

El factor de acoplamiento se puede encontrar a partir de (Ver ecuaciones 24 y 25):

$$k_{23} = \left(\frac{1 + k_{34}^2 Q_3 Q_{4L}}{Q_2 Q_3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

$$k_{34} = \left(\frac{1 + k_{23}^2 Q_2 Q_3}{Q_2 Q_{4L}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

El factor de calidad se obtiene mediante lo siguiente (Ver ecuaciones 26 y 27):

$$Q = w_o \frac{L}{R} \quad (26)$$

$$Q_{jL} = \frac{w_o L_j}{R_j + R_{eff,j+1}} = \frac{Q_j}{1 + k_{j,j+1}^2 Q_j Q_{(j+1)L}}, j = 1, 2, \dots, m-1 \quad (27)$$

Donde $R_{eff,j+1}$ se obtiene a partir de (Ver ecuación 28):

$$R_{eff,j+1} = k_{j,j+1}^2 w_o L_j Q_{(j+1)L}, j = 1, 2, \dots, m-1 \quad (28)$$

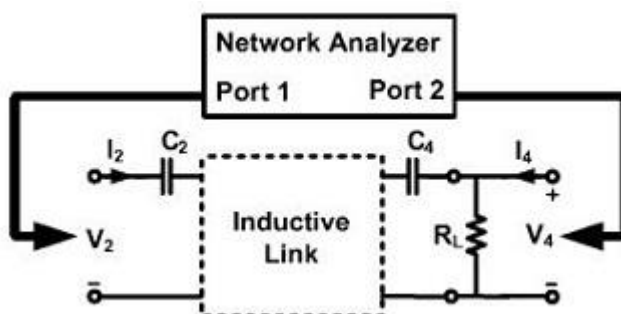
La eficiencia de la etapa de cada acople para enésimo j de $(j+1)$ se puede escribir como (Ver ecuación 29):

$$n_{j,j+1} = \frac{R_{eff,j+1}}{R_j + R_{eff,j+1}} = \frac{k_{j,j+1}^2 Q_j Q_{(j+1)L}}{1 + k_{j,j+1}^2 + Q_j Q_{(j+1)L}} \quad (29)$$

Kiani (2011) presenta un nuevo método para la medición de la eficiencia (PTE) en los enlaces fuertemente acoplados, en este método los condensadores de resonancia son conectados a las bobinas primaria y de carga, que luego son considerados como un sistema de 2 puertos de enlace inductivo, tal y como se muestra en la figura 13. El analizador de red se utiliza para medir los parámetros S y en consecuencia los Z -parámetros se derivan (p.586).

Figura 13.

Modelo analizador de red de dos puertos sintonizado a la frecuencia portadora.



Fuente: Kiani, Design and Optimization of a 3-Coil Inductive Link for Efficient Wireless Power Transmission, 2011, p.586.

Al modelar la arquitectura de enlace de 3 bobinas acopladas mediante el analizador de red de dos puertos se obtiene los parámetros de S , Mehdi Kiani (2011) realiza el montaje experimental y la simulación de los enlaces fuertemente acoplados propuesto en su artículo de investigación, para la simulación de estos sistemas utilizó el software HFSS como se puede observar en la figura 14 B (p.587).

Los S -parámetros se convierten en Z -parámetros como se evidencia a continuación (Ver ecuaciones 30 y 31):

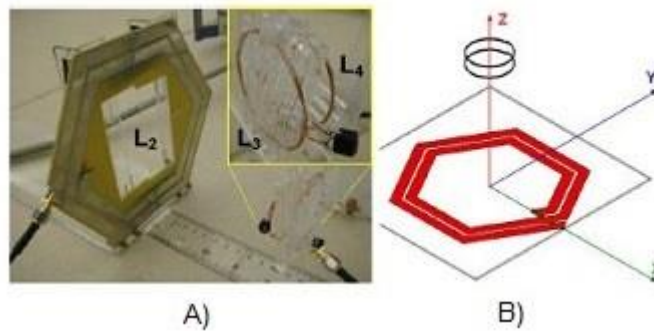
$$Q_2 = \frac{\text{Im}(Z_{22})}{\text{Re}(Z_{22})}, Q_3 = \frac{\text{Im}(Z_{33})}{\text{Re}(Z_{33})} \quad (30)$$

$$k_{23} = \sqrt{\frac{\text{Im}(Z_{23}) * \text{Im}(Z_{32})}{\text{Im}(Z_{23}) * \text{Im}(Z_{33})}} \quad (31)$$

A continuación se evidencia los resultados prácticos y simulados como se observa en la figura 14.

Figura 14.

A) montaje experimental para la medición de la eficiencia (PTE) en un enlace inductivo de 3-bobinas. B) simulación del enlace inductivo de tres bobinas en el software HFSS.

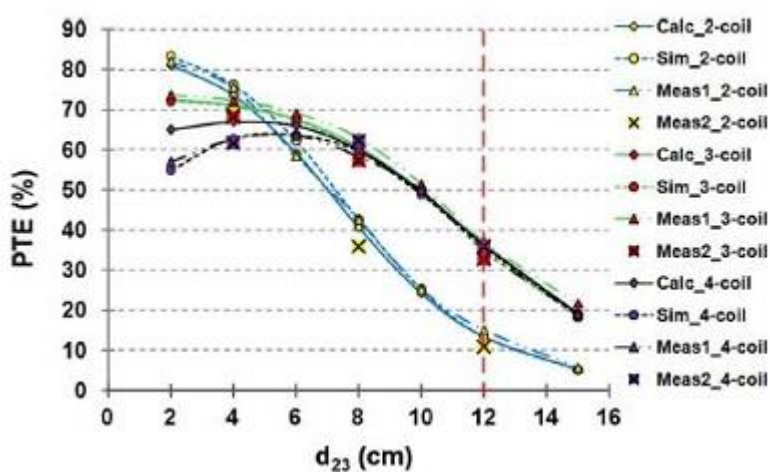


Fuente: Kiani, Design and Optimization of a 3-Coil Inductive Link for Efficient Wireless Power Transmission, 2011, p.587.

En la figura 15, Mehdi Kiani (2011) representa el resultado de la eficiencia en los sistemas de 2, 3 y 4 bobinas fuertemente acopladas a una distancia de 12 cm, gráficamente obtiene un 37% de eficiencia en el enlace de 3 bobinas (p.587).

Figura 15.

Gráfica de la eficiencia para los sistemas de 2, 3 y 4 bobinas.



Fuente: Kiani, Design and Optimization of a 3-Coil Inductive Link for Efficient Wireless Power Transmission, 2011, p.587.

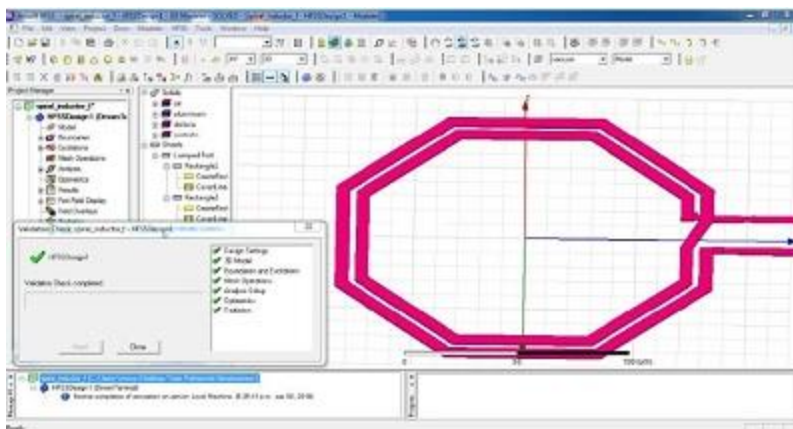
Capítulo 5

5. Validación de Resultados de Mehdi Kiani

La complejidad del tema propuesto por Mehdi Kiani en su artículo de investigación nos lleva en primer punto analizar la tecnología SCMR; como punto de partida en nuestra investigación, nos enfocamos en el análisis principal del enlace de 3 bobinas fuertemente acopladas para luego replicar los resultados en el software HFSS. En la figura 16 se representa el modelo de Mehdi Kiani (p.583).

Figura 16.

Simulación del sistema de enlace de 3 bobinas propuesto por Mehdi Kiani.

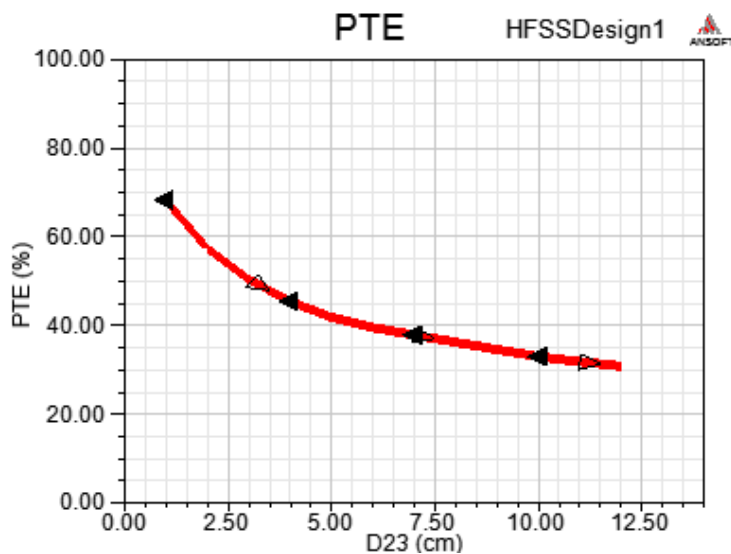


Fuente: Elaboración propia. 2020.

En la figura 17, 18 y 19 se evidencia los resultados obtenidos al replicar el sistema propuesto por Mehdi Kiani (2011, p.587), al analizar la gráfica de la eficiencia se evidencia que a 12 cm se obtiene el 37%, en la figura 18 se observa el lóbulo o patrón de radiación y la ganancia del sistema inductivo.

Figura 17.

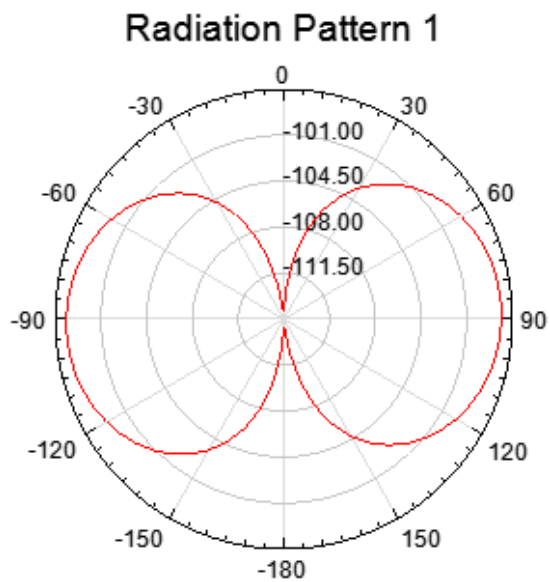
Representación de la eficiencia en el ambiente HFSS para una distancia de acoplamiento de 12cm.



Fuente: Elaboración propia. 2020.

Figura 18.

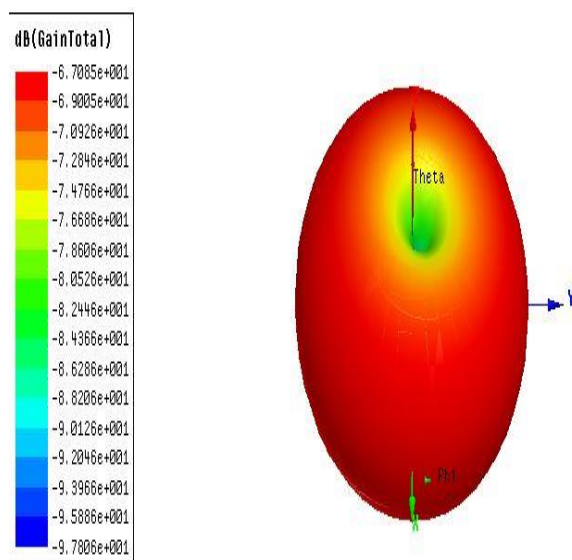
Patrón de radiación del sistema de 3 bobinas inductivas de Mehdi Kiani.



Fuente: Elaboración propia. 2020.

Figura 19.

Ganancia del sistema de 3 bobinas inductivas de Mehdi Kiani.



Fuente: Elaboración propia. 2020.

Capítulo 6

6. Validación del Modelo Modificado

6.1 Introducción

En los capítulos precedentes de este artículo se ha propuesto un enlace inductivo fuertemente acoplado para la transferencia eficiente de energía, posteriormente se analizará el enlace inductivo desde la parte matemática con el fin de evidenciar la mejora de la arquitectura de 3 bobinas fuertemente acopladas propuesto por Mehdi Kiani (2011, p.583). Para ello, se plantea verificar el sistema mediante el software HFSS basado en la propuesta de mejoramiento de la eficiencia a una distancia de acoplamiento de 12 cm.

6.2 Método de verificación

Al no tratarse de un modelo físico verificable mediante ensayo en laboratorio, las características de la propuesta de este artículo obligan a plantear una metodología de verificación basada en otro tipo de comprobación. En concreto, nos limitaremos a replicar los resultados mediante la herramienta HFSS de alto rendimiento para resolver estructuras complejas y demostrar los resultados superiores al 37% de eficiencia a 12cm.

6.3 Modelo matemático

Como punto de partida en nuestra propuesta, se analizará los factores incidentes en la geometría del sistema:

Ítem 1. Se deben considerar restricciones de diseño impuestas por la tecnología de las bobinas de fabricación, inicialmente definimos el diámetro externo (D), el ancho de la línea (w) y

espacio entre línea(s), un tema más detallado de cómo elegir los valores adecuados se pueden presentar en: (Georgakopoulos, Analysis and Design of BroadBand Wireless Power Transmission System Via Conformal Strongly Coupled Magnetic Resonance).

$$D_1 = 16.8cm$$

$$D_2 = 16.8cm$$

Diámetro de la bobina

$$D_3 = 4cm$$

$$D_4 = 4cm$$

Ancho de la línea modificada

$$w_1, w_2 = 8.70cm$$

$$w_3, w_4 = 0.64mm$$

Espacio entre línea

$$s_1, s_2 = 2.6mm$$

$$s_3, s_4 = 100\mu m$$

Para maximizar la eficiencia del sistema de estas características se define el factor de calidad de la primera etapa como: $Q_2 = 255$ y $Q_3 = 177$ Según (Kiani, 2011, p.588);

Ítem 2. Se obtiene el factor de calidad según la ecuación 27.

$$Q_{jL} = \frac{w_o L_j}{R_j + R_{refj, j+1}} = \frac{Q_j}{1 + k_{j+1}^2 Q_j Q_{(j+1)L}}, j = 1, 2, \dots, m-1$$

$$Q_{3L} = 45,4$$

Ítem 3. Posteriormente se calcula los factores de acoplamiento utilizando las ecuaciones (24) y (25) teniendo en cuenta que el factor de acoplamiento de la primera etapa está definida por

$K_{23} = 9 * 10^{-3}$ según (Kiani, 2011, p.588);

$$k_{23} = \left(\frac{1 + k_{34}^2 Q_3 Q_{4L}}{Q_2 Q_3} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$k_{23} = 9 * 10^{-3}$$

$$k_{34} = \left(\frac{1 + k_{23}^2 Q_2 Q_3}{Q_2 Q_{4L}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$k_{34} = \left(\frac{1 + (9 * 10^{-3})^2 (255)(177)}{(177)(45)} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$k_{34} = 0,227442$$

Ítem 4. Calculamos la eficiencia aplicando la ecuación del enlace modificado según la ecuación 18.

$$n_{3-coil} = \frac{(k_{23}^2 Q_2 Q_3)(k_{34}^2 Q_3 Q_{4L})}{\cos(\theta)(1 + k_{34}^2 Q_3 Q_{4L})\sqrt{A^2 + B^2}} \frac{Q_{4L}}{Q_L}$$

$$n_{3-coil} = 48\%$$

Se calcula los parámetros de A , B y θ

$$A = 1 + k_{23}^2 Q_2 Q_3 + k_{34}^2 Q_3 Q_{4L}$$

$$A = 1 + (9 * 10^{-3})^2 (255)(177) + (0,227442)^2 (177)(45,4)$$

$$A = 420,346771$$

$$B = 2Q_2 Q_3 Q_{4L} k_{34} k_{23} k_{24}$$

$$B = 2(255)(177)(45,4)(9 * 10^{-3})(0,227442)$$

$$B = 8389,04$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{8389,04}{420,346771}\right)$$

$$\theta = 1,1^\circ$$

Ítem 5. Verificación de la eficiencia del sistema mediante las ecuaciones 22 y 23:

$$n_{23} = \frac{(k_{23}^2 Q_2 Q_{3L})}{1 + k_{23}^2 Q_2 Q_3 + k_{34}^2 Q_3 Q_{3L}}$$

$$n_{23} = \frac{(9 * 10^{-3})^2 (255)(45,4)}{1 + (9 * 10^{-3})^2 (255)(45,4)}$$

$$n_{23} = 0,483943$$

$$n_{34} = \frac{(k_{34}^2 Q_3 Q_{4L})}{1 + k_{34}^2 Q_3 Q_{4L}} \frac{Q_{4L}}{Q_L}$$

$$n_{34} = \frac{(0,227442)^2 (177)(45,4)}{1 + (0,227442)^2 (177)(45,4)} \frac{45,4}{45,26}$$

$$n_{34} = 0,997435455$$

Para el cálculo de la eficiencia total se aplica lo siguiente (Ver ecuación 32):

$$n_{3-coil} = n_{34} * n_{23} * 100\% \quad (32)$$

$$n_{3-coil} = (0,997435455) (0,483943)$$

$$n_{3-coil} = (0,482701906) (100\%)$$

$$n_{3-coil} = 48,2701906\%$$

Ítem 6. En los enlaces fuertemente acoplados es muy importante garantizar entre acople un grado de libertad (eléctrico) como valor máximo, con el fin de garantizar la frecuencia de sintonización y transferir energía de manera eficiente.

A continuación se calcula el ángulo de acople del enlace modificado mediante la ecuación 21:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{8389,04}{420,346771}\right)$$

$$\theta = 1,1^{\circ}$$

6.4 Resultado de la simulación HFSS

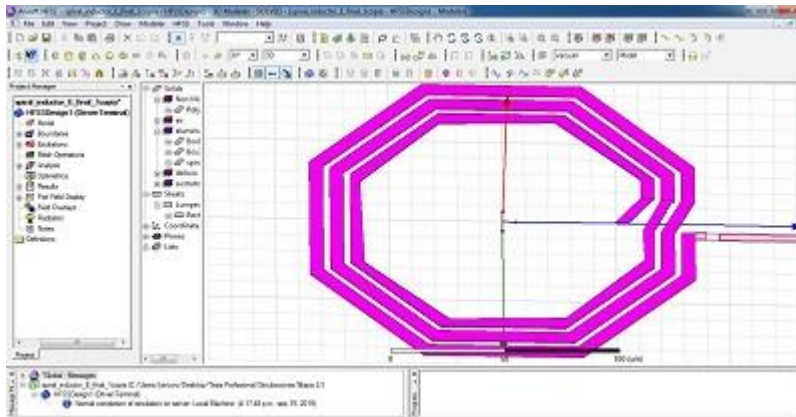
En este capítulo se evidencia detalladamente el proceso realizado por Stavros V. Georgakopoulos (2014, Analysis and Design of Broadband Wireless Power Transmission System Via Conformal Strongly Coupled Magnetic Resonance) quien propone transferir datos por el mismo canal de transmisión de energía de los sistemas SCMR sin afectar su eficiencia, de acuerdo a lo relacionado se analiza desde nuestra investigación con la finalidad de mejorar la eficiencia de la arquitectura de 3-bobinas.

Un punto a tener en cuenta, es que no siempre al aumentar la geometría de estos sistemas se garantiza una buena eficiencia en la transmisión de energía vía inalámbrica, puede que el sistema no funcione en estado resonante presentando fenómenos por división de frecuencia, además no se garantiza que el factor de calidad sea el adecuado para nuestro enlace. A

continuación, se muestra en la figura 20 el enlace de 3 bobinas acopladas con su respectiva simulación en el ambiente HFSS.

Figura 20.

Simulación del enlace de 3 bobinas modificado.



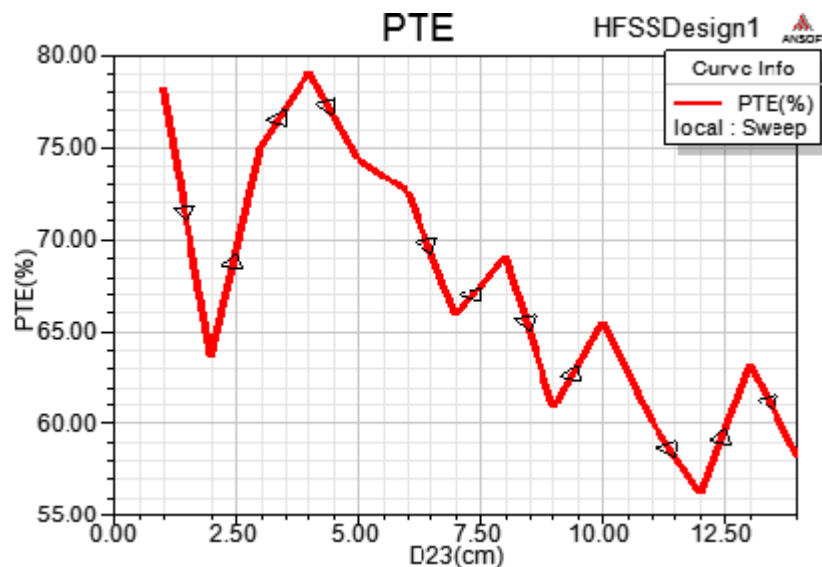
Fuente: Elaboración propia. 2020.

Como se evidencia en la figura 20, es el modelo modificado de Mehdi Kiani utilizando el principio de Stavros V. Georgakopoulos (2014, Analysis and Design of Broadband Wireless Power Transmission System Via Conformal Strongly Coupled Magnetic Resonance) para aumentar la eficiencia en los sistemas de tecnología SCMR, se propone aumentar la geometría de los bucles de radiación de manera eficiente con el fin de disminuir pérdidas por fenómenos de división de frecuencia y acoples de impedancia.

En este primer paso se obtuvo resultados positivos en nuestra arquitectura propuesta, como se puede observar en la figura 21 el primer modelo de simulación logró un resultado variante en la eficiencia del sistema, esto se genera debido al ajuste de la geometría de los bucles de radiación en cada etapa.

Figura 21.

Resultado de la eficiencia del modelo modificado.



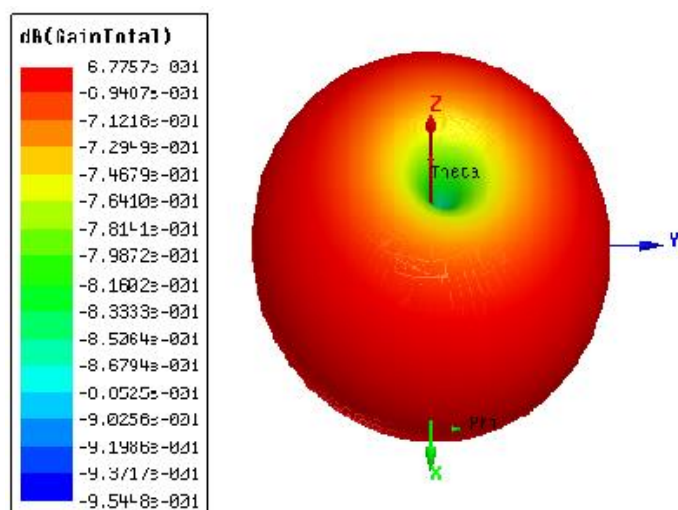
Fuente: Elaboración propia. 2020.

A continuación se muestra el resultado del lóbulo de radiación y concentración del campo electromagnético; para los resultados que se obtuvieron inicialmente, se analiza que uno de los pilares más importantes de esta tecnología se basa en la geometría de los bucles resonantes y en el ancho de banda de transmisión, como lo indica Stavros V. Georgakopoulos (2014, Analysis and Design of Broadband Wireless Power Transmission System Via Conformal Strongly Coupled Magnetic Resonance).

En el primer resultado obtenido se analiza gráficamente mayor concentración del campo electromagnético en relación con el modelo simulado del Doctor Mehdi Kiani en las figuras 18 y 19.

Figura 22.

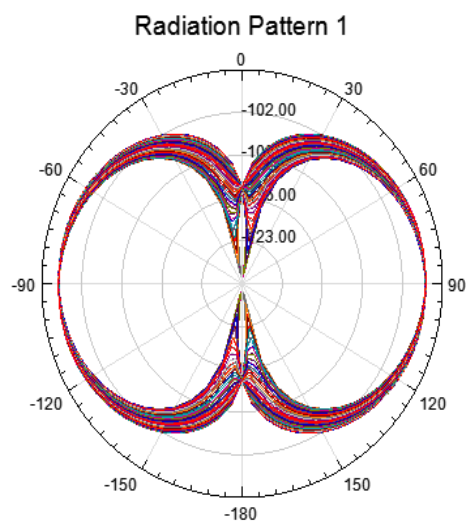
Ganancia del sistema de 3 bobinas inductivas de Modelo modificado.



Fuente: Elaboración propia. 2020.

Figura 23.

Patrón de Radiación del sistema de 3 bobinas inductivas del Modelo modificado.

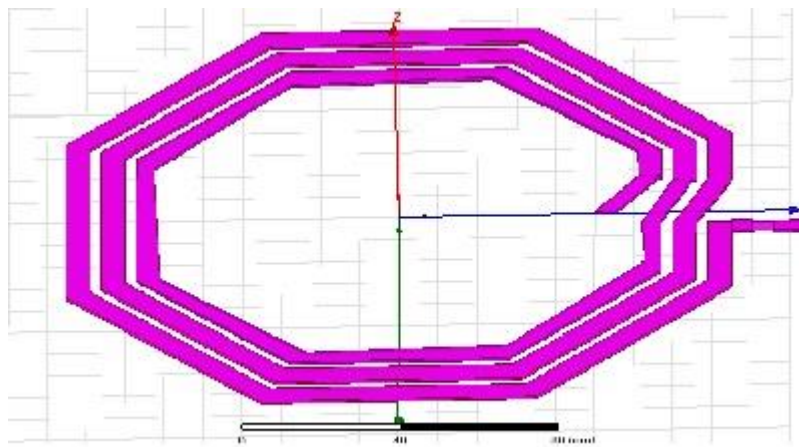


Fuente: Elaboración propia. 2020.

Posteriormente se ajusta la geometría del sistema registrada en el ítem anterior 6.3, obteniendo como resultado final la ganancia en PTE que se planteó teóricamente.

Figura 24.

Modelo Enlace inductivo Modificado: Versión final.

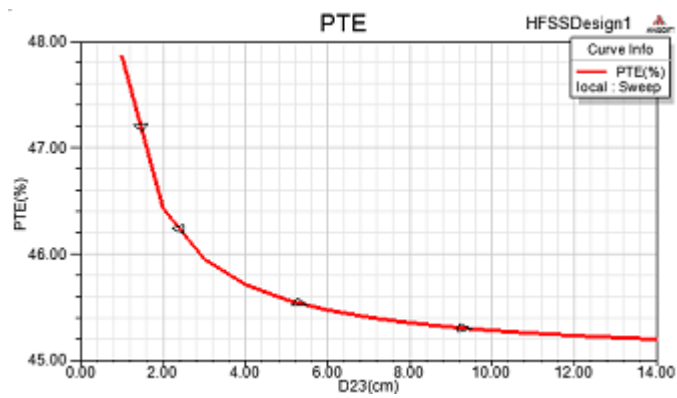


Fuente: Elaboración propia. 2020.

Como se muestra en la figura 25, se cumple el objetivo de nuestra investigación, el cual se plantea obtener una PTE mayor al 37% en la arquitectura de 3 bobinas propuesta anteriormente, al hacer el análisis gráfico se obtiene un 45% de eficiencia en la arquitectura propuesta en nuestro proyecto.

Figura 25.

Resultado de la PTE del modelo modificado obteniendo una eficiencia del 45%.

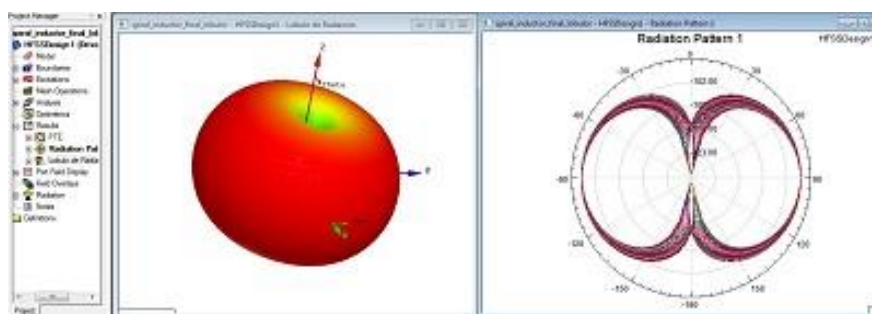


Fuente: Elaboración propia. 2020.

En el modelo de radiación electromagnética, se analiza gráficamente mayor concentración del campo electromagnético acorde a la ganancia obtenida en la figura 25.

Figura 26.

Concentración del campo electromagnético y lóbulo de radiación de modelo final.



Fuente: Elaboración propia. 2020.

Capítulo 7

7. Análisis de resultados

7.1 Introducción

La integración de los sistemas resonadores de forma eficiente es uno de los métodos más importantes del proyecto; por tanto, la delimitación del alcance en el proceso de transferencia eficiente de energía a 12 cm, exige un análisis en profundidad del comportamiento del sistema que se mencionara a continuación:

La distancia en los sistemas con tecnología SCMR, es una variable clave en el análisis a la tipología de resonadores.

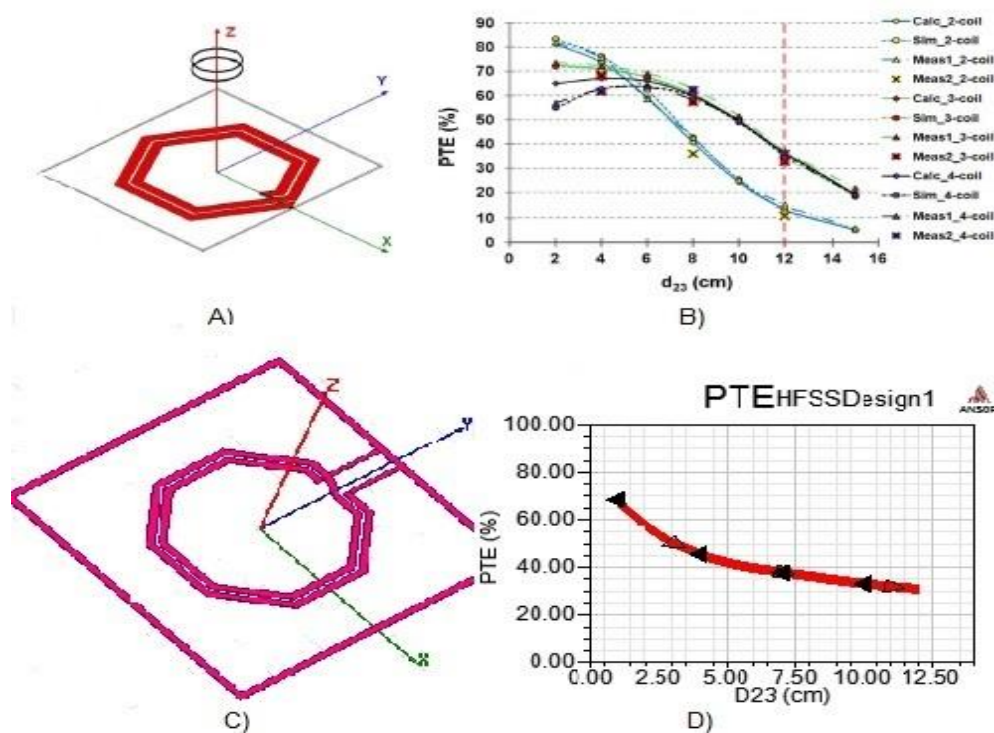
Los resonadores fuertemente acoplados se encargan del transporte de energía sin que exista contacto físico con el receptor, manteniendo una alta eficiencia.

La eficiencia está limitada por la distancia en los sistemas con tecnología SCMR.

Un sistema puede estar compuesto por bucles, hélices o combinaciones.

Figura 27.

Eficiencia de los enlaces de tipo WPT: A) modelo enlace inductivo de 3 bobinas propuesto por Mehdi Kiani. B) comparación de los enlaces propuestos por Mehdi Kiani en relación a la eficiencia (PTE). C) modelo replicado del enlace de Mehdi Kiani. D) representación de la eficiencia del modelo replicado obteniendo gráficamente 37 % de eficiencia a 12 cm de distancia.



Fuente: A) y B) Kiani, Design and Optimization of a 3-Coil Inductive Link for Efficient Wireless Power Transmission, 2011, p.587. C) y D) Elaboración propia. 2020.

7.2 Elaboración del procedimiento

Inicialmente se planteó tener una mejora de 5 p.p con respecto al resultado obtenido por Mehdi Kiani(2011, p.587), con los análisis realizados y expuestos anteriormente, se logra una mejora de 8 p.p en los mismos 12 cm evaluados en el proyecto de investigación, es importante resaltar que el modelo modificado es el sistema que se comporta de la manera más adecuada y entrega la eficiencia mayor debido a la mejora aplicada en la geometría de los bucles, manteniendo entre si un sistema compacto que reduce las pérdidas y mantiene una potencia alta a la salida del sistema. Mantener 3 bobinas fuertemente acopladas permite que el sistema se mantenga estable y sintonizado, esto hace que los resultados sean óptimos y se genere una transferencia de potencia de manera ecuánime evitando fugas de energía debido al medio en el cual se desarrolla la transmisión.

Analizar diferencias en la radiación de los enlaces propuestos.

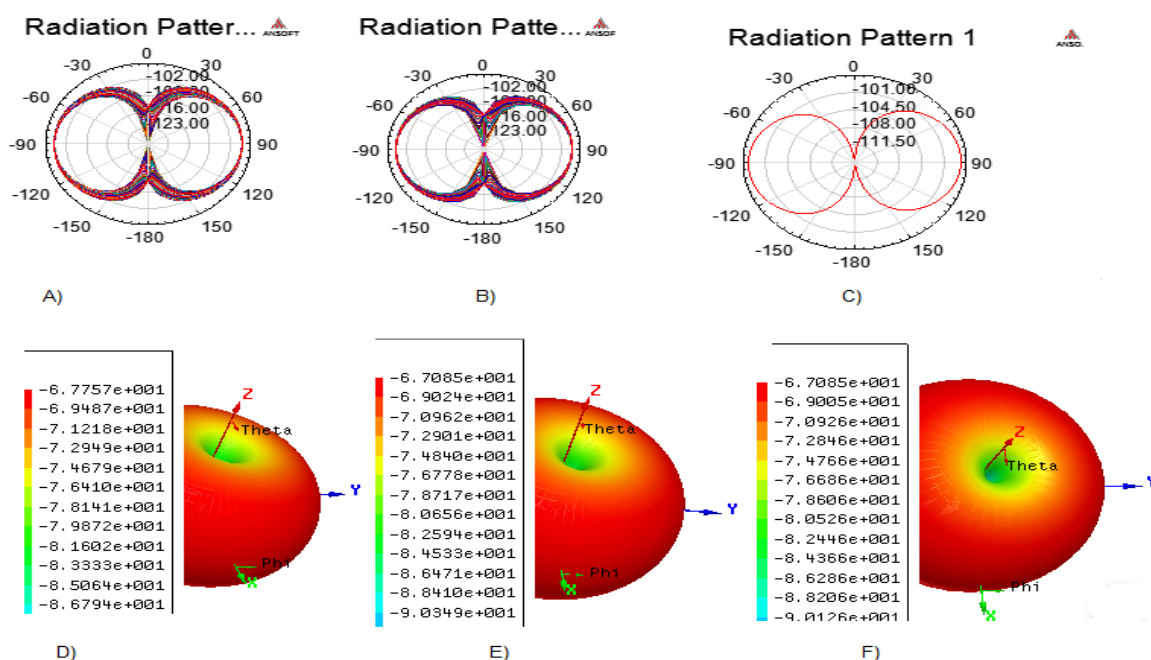
Analizar diferencias en la eficiencia del enlace de 3 bobinas a 12 cm.

Analizar la relación de la distancia con la eficiencia.

Se procede a discutir la interacción de los enlaces de 3 bobinas de Mehdi Kiani y el modelo modificado.

Figura 28.

Análisis gráfico del lóbulo de radiación de los enlaces inductivos propuestos. A) lóbulo de radiación del primer enlace inductivo obteniendo un 57 % de PTE, B) lóbulo de radiación del enlace final obteniendo un 45 % de PTE, C) lóbulo de radiación del enlace replicado 3-coil de Mehdi Kiani obteniendo un 37 % de PTE, D) ganancia del sistema del primer enlace inductivo propuesto obteniendo 57% de PTE, E) ganancia del sistema inductivo final obteniendo un 45% de PTE, F) ganancia del sistema inductivo replicado 3-coil obteniendo un 37% de PTE.



Fuente: Elaboración propia. 2020.

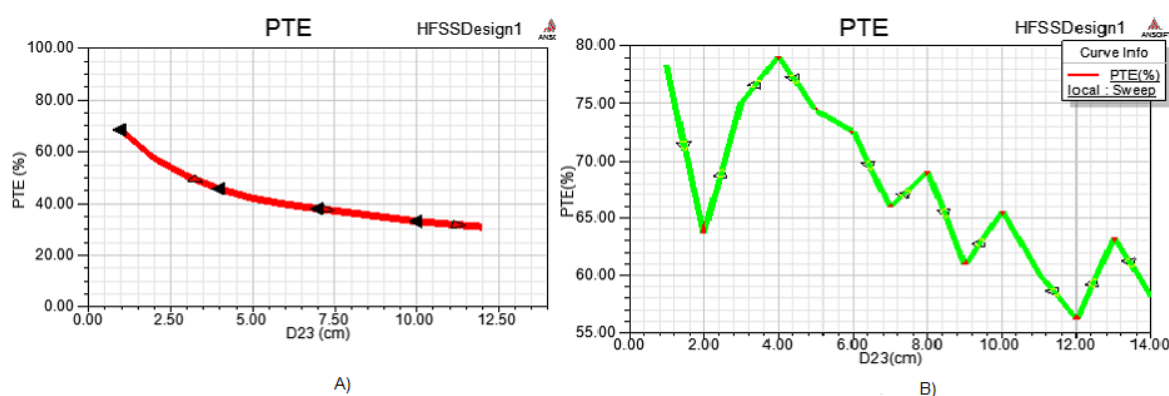
Al realizar esta comparación se analiza la interacción del campo magnético en los enlaces propuestos, como se puede evidenciar en la figura 28 B) se observa gráficamente mayor concentración del campo magnético en la arquitectura modificada en el plano azimut.

La relación del comportamiento de las arquitecturas descritas en el proyecto de investigación es acorde a los resultados obtenidos en el software HFSS; se concluye que el sistema modificado propuesto, tuvo una mejora considerable en relación al enlace de 3 bobinas de Kiani (2011, p.587) obteniendo 8 p.p respecto a la PTE del sistema mencionado.

Posteriormente en el ítem 2 se evaluará el proceso de la transferencia eficiente de energía a una distancia de 12 cm para los enlaces inductivos, el proceso se evidencia en las figuras 29 y 30 donde gráficamente se observa mayor eficiencia en el modelo modificado B).

Figura 29.

Eficiencia del sistema a 12 cm: A) se replica la simulación de la arquitectura de 3 bobinas propuesto por Mehdi Kiani, B) simulación de la arquitectura modificada.

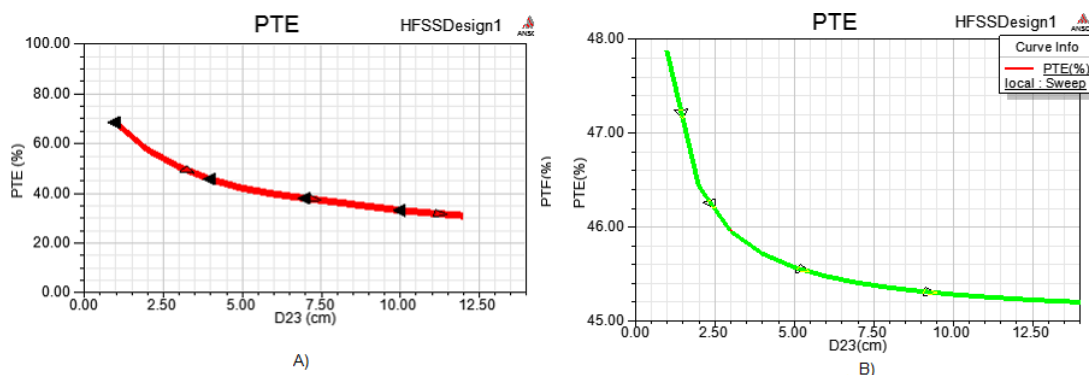


Fuente: Elaboración propia. 2020.

Teniendo en cuenta la información de la gráfica anterior, es importante aclarar que: En la figura 29 B) corresponde al método de mejora propuesto en el proyecto; inicialmente, se evidencia ganancia en la eficiencia a la distancia evaluada, si analizamos detenidamente se logra observar un grado de inestabilidad por el ajuste de la geometría de los bucles de radiación que posteriormente se corregirán, como se puede ilustrar en la figura 30 B), se ajusta los parámetros de los bucles de radiación con el fin de suavizar la transferencia eficiente de energía.

Figura 30.

Eficiencia de la arquitectura propuesta: A) se replica la simulación de la arquitectura de 3 bobinas propuesto por Mehdi Kiani obteniendo una eficiencia del 37 %, B) simulación de la arquitectura modificada obteniendo gráficamente una eficiencia del 45 %.



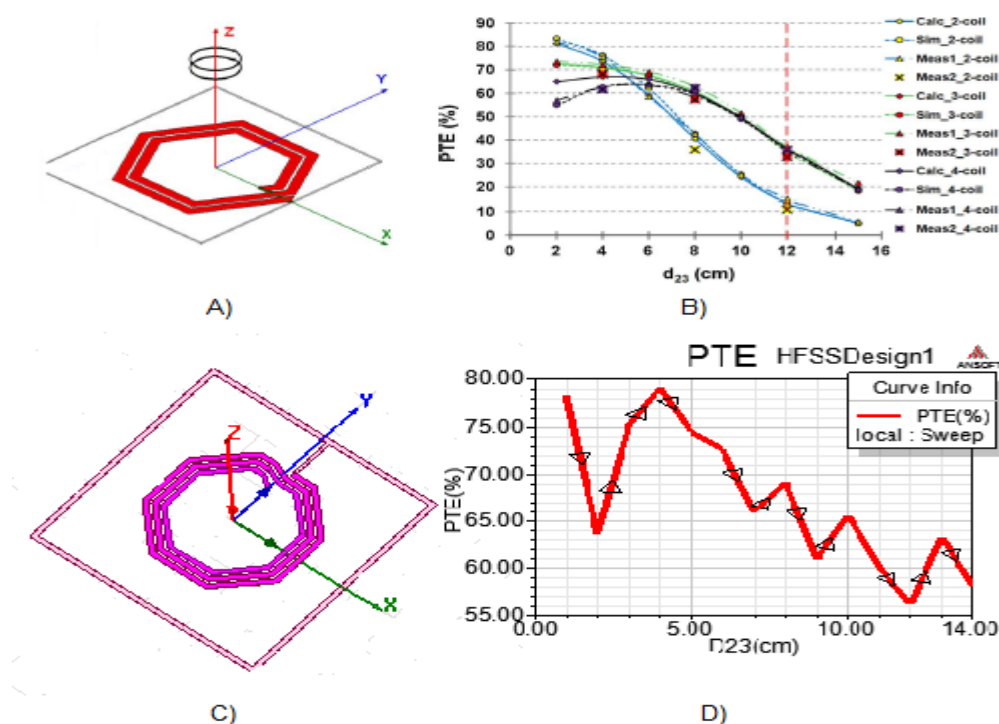
Fuente: Elaboración propia. 2020.

Ítem 3: Una vez concluido el cálculo de los enlaces propuestos en el capítulo anterior, se procede al análisis de la relación distancia-eficiencia y cuál es la mejora que se obtuvo teniendo como punto de partida el modelo del doctor Kiani (2011, p.587). En la figura 28, en B) se observa mayor ganancia en la transferencia eficiente de energía de forma inalámbrica que A), por ende el aumento de la distancia en la arquitectura modificada manteniendo la eficiencia del 45% a 12 cm como punto de partida, nos lleva a concluir que: El modelo modificado propuesto en el proyecto se puede implementar a una distancia mayor a 12cm superando el 37% de eficiencia en la transferencia de energía; además, se evidencia que el modelo final optimiza los parámetros de eficiencia en términos de frecuencia, y asegura que el factor de selectividad esté en su punto máximo de operación, mitigando fenómenos por desalineamiento entre antenas o helicoidales como se observa en la figura 32; en D) se analiza total alineamiento entre la hélice de Tx y Rx

ya que la eficiencia depende de este hecho, y su principal ventaja como enlace directo y estable a nivel de software, y en caso que se implementara a nivel prototipo. En la figura 30, en D) es la representación del primer resultado de nuestra investigación, en la que se puede evidenciar fenómenos por bifurcación al cambio cualitativo de los parámetros de la geometría del sistema acoplada magnéticamente, a nivel software se obtiene una eficiencia del 57 %; si se implementara a nivel prototipo, la optimización en relación al tiempo decrecería linealmente, ya que existiría la posibilidad de tolerar desalineamiento en la hélice Rx por estabilidad de la energía de propagación.

Figura 31.

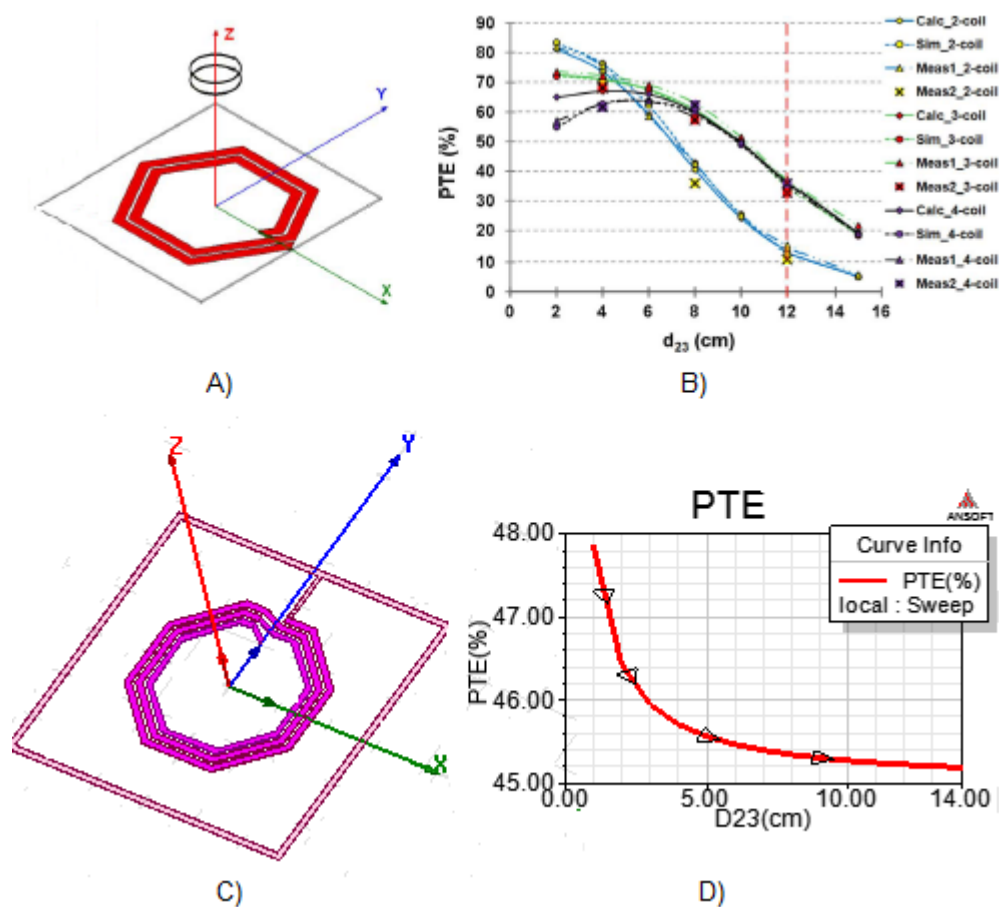
Eficiencia de los enlaces de tipo WPT: A) modelo enlace inductivo de 3 bobinas propuesto por Mehdi Kiani, B) comparación de los enlaces propuestos por Mehdi Kiani en relación a su eficiencia (PTE), C) modelo enlace inductivo propuesto, D) representación de la eficiencia del primer modelo propuesto.



Fuente: Elaboración propia. 2020.

Figura 32.

Eficiencia de los enlaces de tipo WPT: A) modelo enlace inductivo de 3 bobinas propuesto por Mehdi Kiani, B) comparación de los enlaces propuestos por Mehdi Kiani en relación a su eficiencia (PTE), C) modelo enlace inductivo final, D) representación de la eficiencia del modelo final.



Fuente: Elaboración propia. 2020.

Conclusiones

De acuerdo al análisis de los capítulos anteriores podemos extraer las siguientes conclusiones:

Teniendo en cuenta que el objetivo del proyecto fue proponer una mejora en la PTE a la arquitectura propuesta por el Doctor Kiani, se concluye que el modelo modificado cumple con los parámetros de PTE y además complementa los sistemas con tecnología SCMR.

Se considera que por medio de la investigación y el análisis del proyecto realizado se aporta avances a futuras aplicaciones en el campo de la tecnología.

En la actualidad se vienen desarrollando tecnologías en ciernes con el fin de optimizar los recursos naturales, uno de los propósitos del proyecto es contribuir en el desarrollo de avances tecnológicos que puedan suplir las exigencias y el constante crecimiento de nuestra sociedad.

La metodología empleada en los procedimientos aplicados para sistemas SCMR, permiten que los resonadores múltiples estén sintonizados a la misma frecuencia de resonancia con el fin de evitar fenómenos por división de frecuencia y onda reflejada.

Así mismo se constata que no siempre el aumento de la geometría de los bucles resonadores garantiza la ganancia del sistema, por lo tanto, se debe tener en cuenta varios parámetros como se explica en el desarrollo del proyecto de investigación. Se concluye, que el desarrollo de la arquitectura modificada logra cumplir con el objetivo principal en 8 p.p del valor propuesto por el Doctor Kiani.

Recomendaciones

Los sistemas SCMR se caracterizan por la eficiencia en la transferencia de energía sin contacto físico, debido a este parámetro se afirma que la geometría de los enlaces fuertemente acoplados determinan el buen funcionamiento y la entrega eficiente de energía al receptor.

Las arquitecturas de auto-resonadores inductivos, presentan agentes que minimizan la eficiencia de cualquier sistema como son: inductancias y capacitancias parásitas así como resistencias parásitas, en el proceso de investigación se logra contrarrestar fenómenos inducidos ajustando el factor de calidad a su valor máximo.

Para los diferentes tipos de arquitecturas es muy importante asegurar entre cada acople inductivo un grado de libertad como valor máximo, este parámetro optimizara la eficiencia del sistema y consigo una mejora en la entrega de energía vía inalámbrica.

Como trabajos futuros se plantea la implementación del modelo modificado en aplicaciones específicas de cualquier tipo con tecnología SCMR; como se mostró en el desarrollo del proyecto, el sistema se adapta cómodamente a cualquier aplicación de tipo WPT, además se plantea su diseño a bobinas de clase WWC con el fin de implementar la arquitectura propuesta con potencia superior a un kilovatio (1kw) entregado a la carga.

Lista de referencias

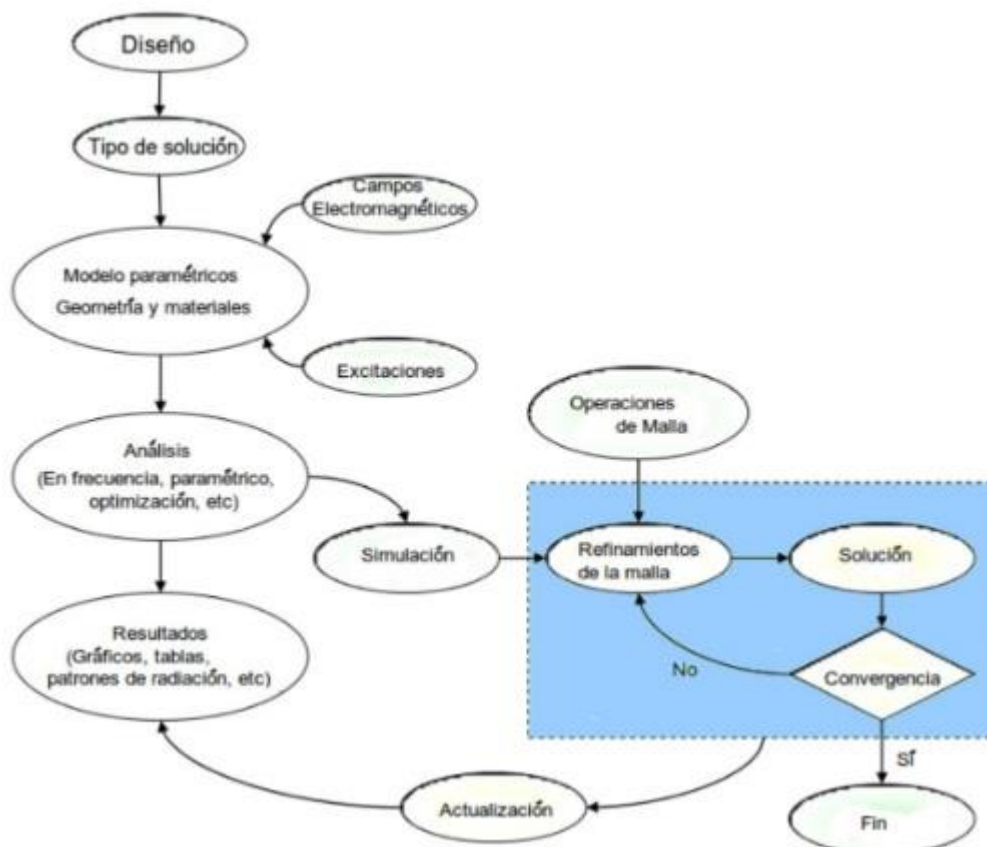
- Nicola Tesla. (1900). The Transmission of Electrical Energy Without Wires, Electrical World and Engineer.
- Sinisa Jurkovic & otros. (2016). Electric Traction Motors for Cadillac CT6 Plugin. Hybrid-Electric Vehicle
- M. Kiani & otros. (2011). Design and Optimization of a 3-Coil Inductive Link for Efficient Wireless Power Transmission.
- V. Georgakopoulos & otros. (2014). Analysis and Design of BroadBand Wireless Power Transmission System Via Conformal Strongly Coupled Magnetic Resonance.
- André Kurs. (2007). Power Transfer through Strongly Coupled Resonances.
- Cannon, B.L. & otros. (2009). Magnetic Resonant Coupling as a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers.
- Imura. & otros. (2011). Basic Study on Reduction of Reflected Power Using DC/DC Converters in Wireless Power Transfer System Via Magnetic Resonant.
- Kim, Jinwook. & otros. (2012). Optimal Design of a Wireless Power Transfer System With Multiple Self-Resonators for an LED TV.
- Joachim Drunart. & otros. (2015). Concept Study of a Double Rotor Induction Machine Used as Continuously Variable Transmission
- Kennan. & otros. (2008). Efficient Wireless Transmission of Power Using Resonators With Coupled Electric Fields.
- Jesús Martínez. (2016). Transmisión de Energía Eléctrica por Inducción para Uso Domestico
- J. Gilli. (s.f) Introducción a la Resonancia Magnética en Neuroimagen
- André Kurs. & otros. (2007). Wireless Power Transfer Via Strongly Coupled Magnetic Resonances.
- Menau. (2017). Transmisión de Energía Vía Resonancias Magnéticas Fuertemente Acopladas. Nuevos tipos de Resonadores.

Anexos

A. Anexo: Diagrama de flujo proceso HFSS.

Figura 33.

Diagrama de flujo del proceso HFSS.



Fuente: V. Tapia, Tomado del manual introductorio a HFSS, s.f, p.3.

B. Anexo: Simulación del Modelo SCMR.

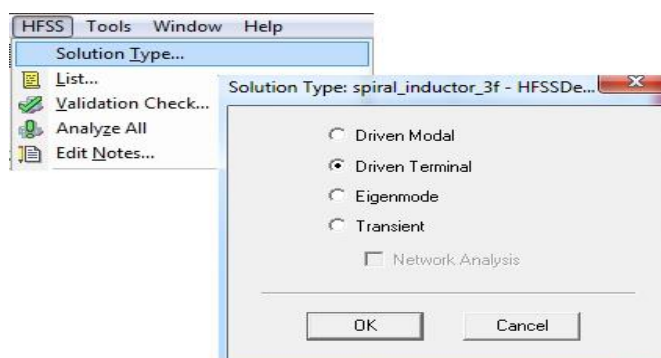
Se crea la estructura física en 3D del modelo asistido; en la ventana del menú del software HFSS se despliegan una lista de herramientas posibles a las que se puede acceder y las cuales determinan cierto tipo de análisis según se requiera en el modelamiento, para este caso se

va hacer uso de las características físicas y electromagnéticas que puedan tener un acercamiento adecuado a la realidad.

Ítem 1 Modelamiento. En este ítem se especifica la creación del modelo en 3D y selección del tipo de solución. El software empleado nos permite seleccionar la herramienta que más se ajuste a la realidad de acuerdo a sus atributos físicos, seleccionaremos en el menú del software la opción hfss con el fin de especificar el tipo de solución que más se ajusta a lo que queremos diseñar como se observa en la figura 34.

Figura 34.

Selección del tipo de solución del sistema.

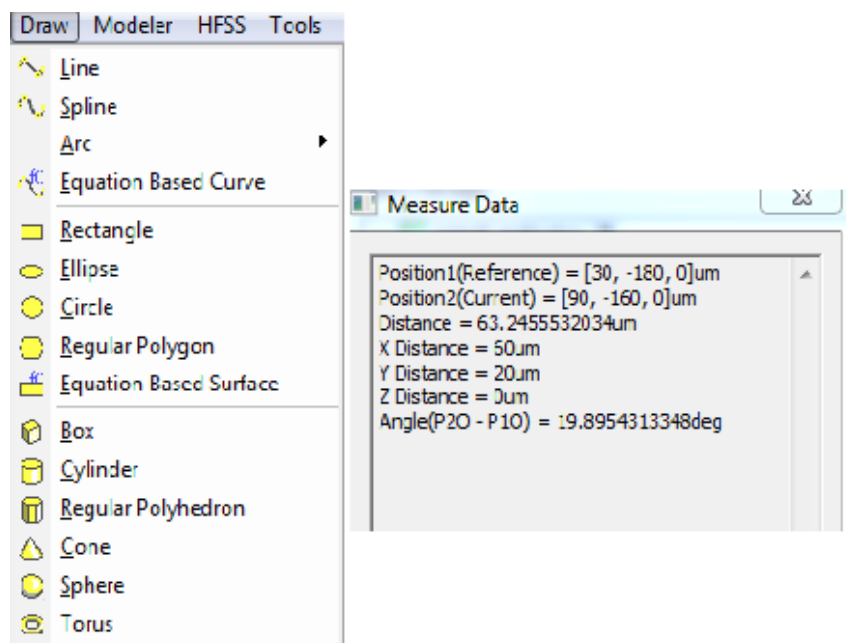


Fuente: Elaboración propia software HFSS. 2020.

Ítem 2 Características del modelo. En este ítem se especifica las unidades del modelo y creación de su geometría en 3D: Haciendo doble click o seleccionando la opción *modeler* en la barra del menú se despliega una pestaña en la cual seleccionaremos la opción *units* que se utilizara en el modelo de cada spiral, posteriormente seleccionaremos en la barra de herramientas las características del material y su geometría como se observa en las figuras 35 y 36.

Figura 35.

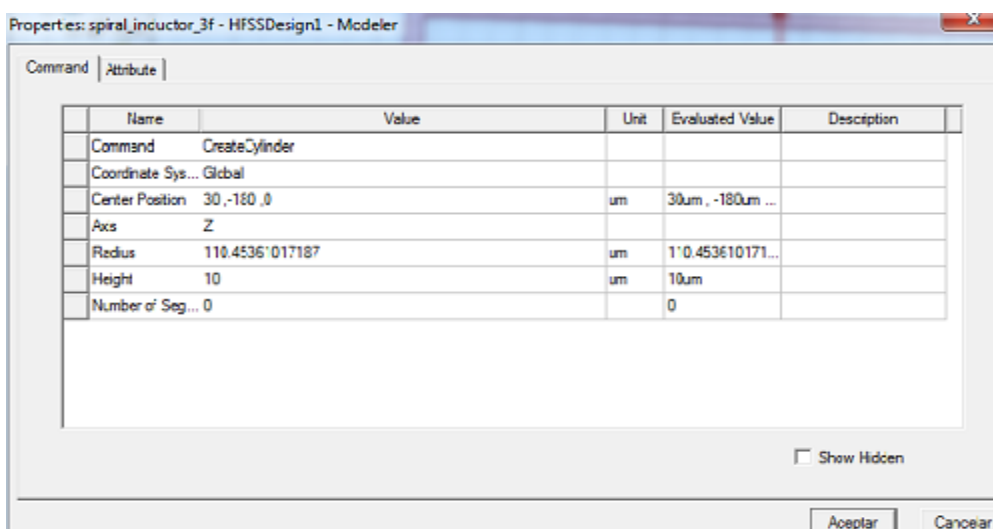
Selección del objeto y su geometría.



Fuente: Elaboración propia software HFSS. 2020.

Figura 36.

Especificación de la geometría de cada bucle.

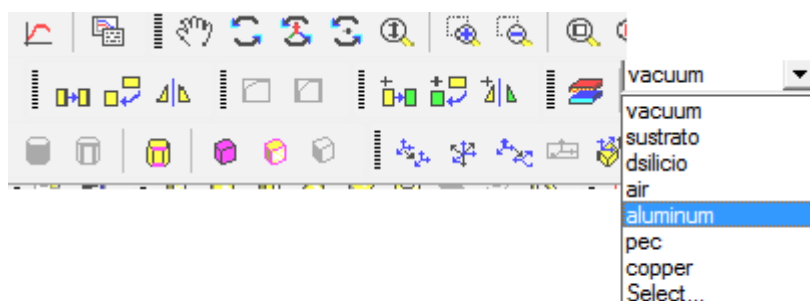


Fuente: Elaboración propia software HFSS. 2020.

Ítem 3 Selección del material de cada espiral. Para la selección del material de los espirales, hacemos doble click en la barra de herramientas en la opción *Assign material* y seleccionamos el tipo de material y sus atributos físicos como se muestra en las figuras 37 y 38.

Figura 37.

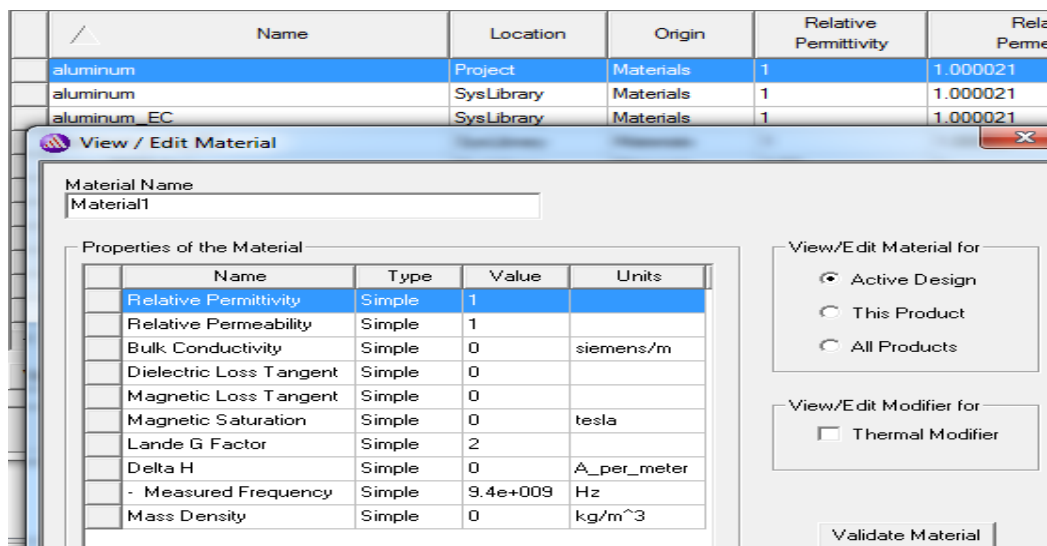
Selección del tipo de material.



Fuente: Elaboración propia software HFSS. 2020.

Figura 38.

Atributos del material.

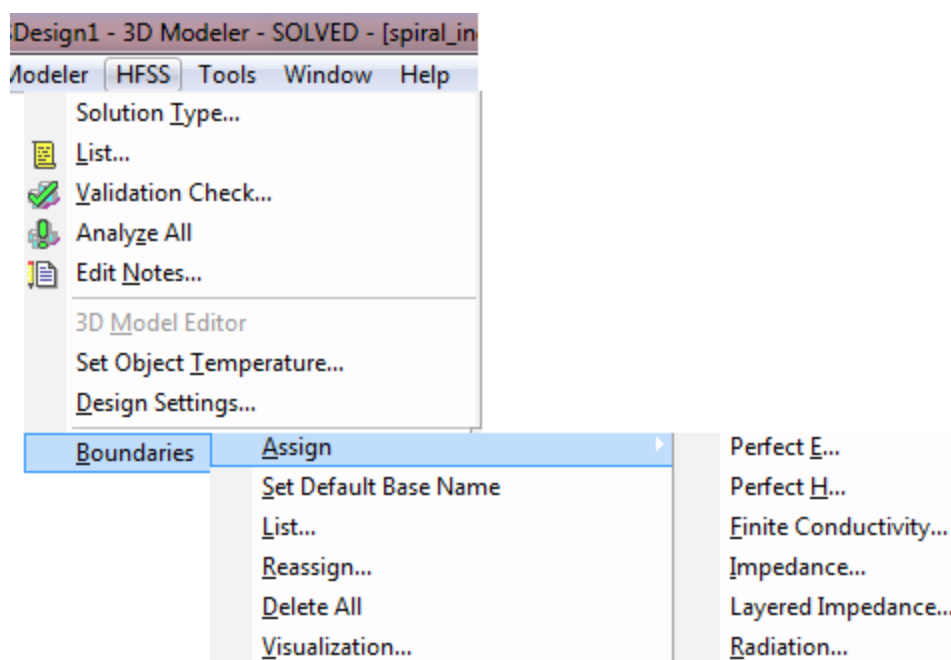


Fuente: Elaboración propia software HFSS. 2020.

Ítem 4 Propiedades electromagnéticas. Seleccionamos en la barra del menú *hfss*, donde se despliega una lista de opciones dando doble click en *excitations* > *Assign* > *perfect H* > *conductivity* en la que se especificaran los puertos de excitación de cada spiral como se observa en la figura 39, posteriormente se debe tener un puerto concentrado que funcione como fuente, capacitancia para completar el circuito tanque o carga según se requiera. El puerto siempre debe ir entre los conductores y todo es construido con planos en el ambiente HFSS.

Figura 39.

Asignacion de las propiedades electromagnéticas y puertos de excitación.



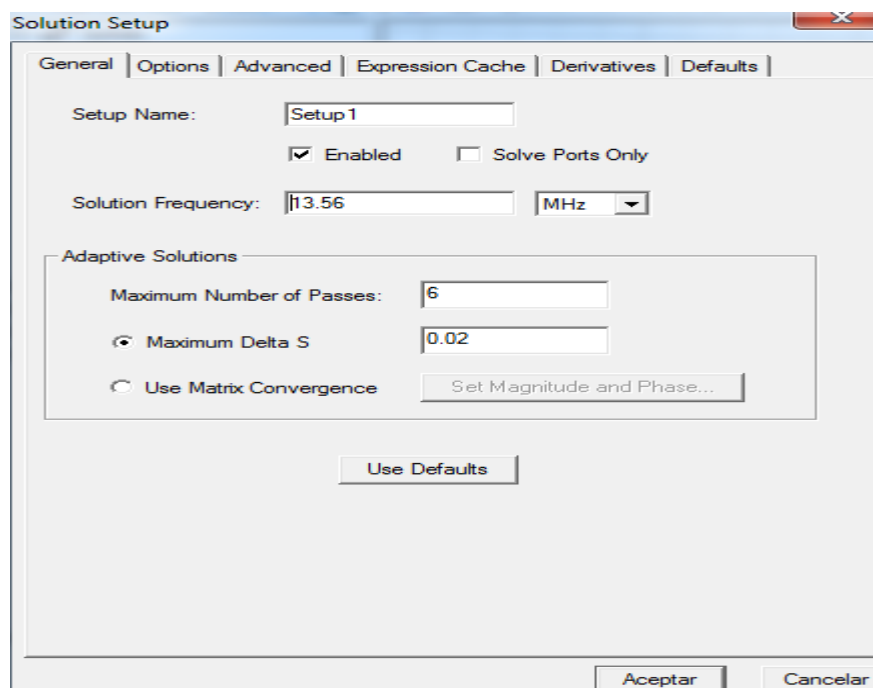
Fuente: Elaboración propia software HFSS. 2020.

Ítem 5 Simulación. Para completar el modelo se requiere un entorno que se asemeje a las condiciones de la realidad, por lo cual se crea un ambiente que represente un entorno de tipo aire, lo siguiente que se debe configurar es la parte física, en la que el software nos permite añadir propiedades a los componentes que hacen parte del modelo.

Luego de todo el procedimiento y replicando los pasos anteriores para la configuración de las demás espirales que conforman la arquitectura, se procede a sintetizar el modelo en la barra *menú* seleccionamos *HFSS> Analysis Setup> Add Solution Setup*, se especifica la frecuencia de operación del sistema como se observa en la figura 40.

Figura 40.

Simulación y asignación de la frecuencia de operación.



Fuente: Elaboración propia software HFSS. 2020.